

# Untersuchung zur Vermeidung der Blaulichtanteile bei der Hintergrundbeleuchtung von Displays unter Einsatz von LED-Clustern mit steuerbarem Farbspektrum

vom Fachbereich 4  
der Universität Hildesheim  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)  
genehmigte Dissertation  
mit dem Schwerpunkt Technik

von

Dipl.-Ing. (FH) Nils Habich

Referenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Rüdiger Böhmer  
Prof. Dr.-Ing. Kai Homeyer  
Prof. Dr. rer. nat. Kay-Rüdiger Harms

Hildesheim 2018

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Abbildungen und Fotos sind von mir selbst erstellt, soweit diese nicht anders gekennzeichnet sind. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Hildesheim, September 2018

## **Danksagung**

Mein Dank geht an erster Stelle an Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Rüdiger Böhmer für die Überlassung des spannenden Themas, für die Betreuung während der Promotion und für die Begutachtung dieser Arbeit.

Ein Dankeschön geht an Herrn Dr. Weiss für seine umfangreiche Unterstützung. Herr Weiss stand mir stets als Betreuer für Fragen, Anregungen und mit Verbesserungsvorschlägen zur Seite.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Homeyer von der Hochschule Hannover und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Kay-Rüdiger Harms von Hochschule Wolfsburg für die freundliche Übernahme als Referent im Promotionsverfahren bedanken.

Ich möchte mich bei Frau Roth, Herrn Lauer, Frau Schroll und Herrn Herrmann für die gute Zusammenarbeit und die technischen Unterstützungen in den Werkstätten bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen KorrekturleserInnen, die viele Stunden ihrer Zeit geopfert haben, namentlich möchte ich an dieser Stelle meinen Vater Herrn Dr.-Ing. Günter Habich nennen.

Ein besonderer Dank gilt Frau Laura Müller, die mich immer unterstützt, aufgemuntert und bei der Korrektur der Arbeit mitgewirkt hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben und mich auch während der Promotion immer unterstützt haben.

## Kurzfassung

Für die Hintergrundbeleuchtung bei Anzeigegeräten werden zunehmend LEDs eingesetzt. LEDs zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer, geringe Energieaufnahme und kompakte Bauweise aus. Die hohe Emission des blauen Lichts im Spektrum von LEDs kann den menschlichen Organismus negativ beeinflussen.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um die Konstruktion und Realisierung einer neuartigen LED-Hintergrundbeleuchtung unter Einsatz von LED-Clustern mit steuerbarem Farbspektrum. Das System wird über einen Micro-Controller gesteuert, der einen beliebig vorgegebenen tagesverlaufähnlichen Beleuchtungszustand unter Verwendung verschiedener Parameter wie Umgebungslicht, Tageszeit und Farbwiedergabe aufrechterhält. Ziel ist es, die Blaulichtemission des Lichtspektrums präzise zu regeln.

Die Untersuchungen auf dem eigens hierfür entwickelten Prüfstand haben ergeben, dass die Blaulichtemission einer LED-Hintergrundbeleuchtung durch ein gesteuertes Farbspektrum gezielt kontrolliert werden kann. Ein positiver Nebeneffekt ist die Möglichkeit, mit dieser Apparatur die Farbtemperatur und die Farbwiedergabe im Farbspektrum zu beeinflussen. Die erzielten Resultate werden insgesamt als Bestätigung für die Maßnahmen zur Reduzierung der Blaulichtemission gewertet.

**Schlagwörter:** LED-Hintergrundbeleuchtung, Blaulichtemission

## Abstract

Backlight LEDs enjoy increasing use for background lighting in display devices. LEDs are characterized by a long-lasting service life, low energy consumption and compact design. However, the high emission of blue light in the spectrum of LEDs can adversely affect the human organism.

The issue of this work is the design and realization of an innovative LED background lighting with a controlled color spectrum. The system is regulated by a microcontroller, which maintains an arbitrary pre-defined daylight-related lighting condition using various parameters such as ambient light, daytime and color reproduction. The aim is to precisely regulate the blue emission of the light spectrum.

Research on this test, which has been especially developed for this reason, has shown that the blue emission of an LED background illumination can be specifically regulated by a controlled color spectrum and thus can be reduced or completely avoided. A positive side effect is the possibility to influence the light color and the color reproduction in the color spectrum with this apparatus. Overall, the results obtained are taken as confirmation of the measures to reduce the blue emission.

**Keywords:** LED background illumination, blue light emission



# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung.....</b>	<b>I</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>Typografische Konventionen .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1     <b>Einleitung .....</b></b>	<b>1</b>
1.1     Aufgabenstellung .....	2
1.2     Aktuelle Leuchten-Systeme .....	3
1.3     Stand der Technik .....	5
1.4     Problematik bei aktuellen Leuchten-Systemen.....	29
1.5     Farbwahrnehmung des menschlichen Auges .....	32
<b>2     <b>Anforderungen an das zu realisierende System .....</b></b>	<b>35</b>
2.1     Basisfunktionen.....	37
<b>3     <b>Systemdesign .....</b></b>	<b>41</b>
3.1     Systemkonzept .....	41
3.2     Leuchtenspezifische Parameter und Ansteuerung der LED-Leuchte	42
3.2.1     Auswahl der Steuerungsmöglichkeiten .....	42
3.2.2     Beschreibung .....	44
3.2.3     Steuerung .....	48
<b>4     <b>Hardwaredesign.....</b></b>	<b>49</b>
4.1     Auswahl der LEDs .....	49
4.1.1     Leuchtenträger .....	51
4.2     Stromversorgung und Anbindung.....	52

<b>5</b>	<b>Implementierung.....</b>	<b>53</b>
5.1	Inbetriebnahme der Testumgebung .....	53
5.2	Aufbau der Leuchte .....	55
5.3	Vermessung der benötigten LEDs .....	57
5.4	Inbetriebnahme der Ansteuerung.....	60
5.5	Konfiguration der Ansteuerung .....	63
5.6	Konfiguration der Leuchte.....	66
<b>6</b>	<b>Evaluation .....</b>	<b>69</b>
6.1	Technische Daten .....	69
6.2	Testumgebung mit HGBSK.....	73
6.2.1	<i>f.lux</i> zur Reduzierung des Blaulichtanteils im Vergleich zur HGBSK .....	86
6.2.2	Optischer Filter ( <i>ZEISS BlueProtect</i> ) zur Reduzierung des Blaulichtanteils im Vergleich zur HGBSK .....	89
6.2.3	Optischer Filter (Bildschirmbrille) zur Reduzierung des Blaulichtanteils im Vergleich zur HGBSK .....	93
6.2.4	Optimierung durch Konfiguration der HGBSK .....	97
<b>7</b>	<b>Resümee und Ausblick .....</b>	<b>103</b>
	<b>Glossar.....</b>	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>109</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>115</b>
	<b>Anhang A: Installation von Raspbian Jessie with PIXEL.....</b>	<b>i</b>
A1	Vorbereitung der Installation.....	i
A2	Bestimmung der IP-Adresse des Raspberry Pi.....	ii
A3	Verbindung zum Raspberry Pi herstellen.....	ii
A4	Konfiguration des Raspberry Pi .....	iv
	<b>Anhang B: Installationsschritte für QLC + .....</b>	<b>ix</b>
B1	Installation von QLC + .....	ix
B2	Konfiguration von QLC + .....	x
	<b>Anhang C: Remoteverbindung zum Raspberry Pi .....</b>	<b>xiii</b>
	<b>Anhang D: Transmission des Hintergrundbeleuchtungsaufbaus mit LCD .....</b>	<b>xv</b>
	<b>Anhang E: Kalibrierung der LCD.....</b>	<b>xvii</b>
	<b>Anhang F: Detailergebnisse der Versuche.....</b>	<b>xix</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Inschrift der Göbel-Bastei, Ort: Springe, Deisterpforte .....	1
Abb. 1-2: OP-Beleuchtung .....	3
Abb. 1-3: Übersicht zum Stand der Technik .....	6
Abb. 1-4: PI-LED, schematische Anordnung der LEDs .....	7
Abb. 1-5: moderne Beleuchtung im Bildungsbereich .....	8
Abb. 1-6: Sonnenlicht-Weckleuchte.....	9
Abb. 1-7: Einsatz von blauem Licht zur Leistungssteigerung.....	9
Abb. 1-8: Funktionsweises eines transmissiven Displays .....	10
Abb. 1-9: Funktionsweise eines reflektiven Displays .....	10
Abb. 1-10: Funktionsweise eines transflektiven Displays.....	11
Abb. 1-11: SIP-Telefon, CISCO CP-6945.....	12
Abb. 1-12: Schichtaufbau einer Leuchtfolien.....	12
Abb. 1-13: Hintergrundbeleuchtung mit CCFL.....	13
Abb. 1-14: CIE-Normfarbtafel mit eingezeichnetem NTSC-, RGB-LED-, White LED- und CCFL Farbraum (Quelle verändert nach powerelectronics, 2016) .....	15
Abb. 1-15: Spektrum einer Hintergrundbeleuchtung mit CCFL (Monitormodell: iiyama B2409HDS).....	16
Abb. 1-16: Normspektralwerte CIE 1931 (CIE Standard Colorimetric Observer Data, 1931).....	17
Abb. 1-17: Spektrum einer weißen LED einer Hintergrundbeleuchtung und die Kennlinien der Rot-, Grün- und Blau-Filter einer LCD-Matrix .....	18
Abb. 1-18: Erweiterung der LCD-Matrix durch einen weiteren gelb-Filter (schematische Darstellung).....	18
Abb. 1-19: Erweiterung des Farbraums.....	19
Abb. 1-20: Edge-Backlight .....	20
Abb. 1-21: Draufsicht Lichtleiterplatte.....	20
Abb. 1-22: Nahaufnahme des Diffusionsmusters .....	20
Abb. 1-23: Schnitt durch ein Edge-Backlight (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM).....	21
Abb. 1-24: Direct-LED-Backlight Werbetafel, Ort: Hildesheim, Bushaltestelle Hansering .....	21
Abb. 1-25: Abstrahlwinkel verschiedener LEDs.....	22
Abb. 1-26: Schnitt durch ein Full-LED-Backlight (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM).....	22
Abb. 1-27: Glasrohr mit Quantenpunkten .....	23
Abb. 1-28: Schnitt durch ein Edge-Backlight mit Quantenpunktrohr (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM) .....	23
Abb. 1-29: Funktionsweise eines Backlights mit Quantenpunktfolie (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM) .....	24
Abb. 1-30: Spektrum Lenovo T530 ohne und mit <i>f.lux</i> aktiviert .....	26
Abb. 1-31: Spektrum <i>Samsung</i> Galaxy S5 ohne und mit <i>Twilight</i> aktiviert.....	26

Abb. 1-32: Blaulichtanteil bei LED-Monitoren soll reduziert werden .....	27
Abb. 1-33: „DuraVision® BlueProtect“ Filter Glas gemessen für eine Halogenleuchte .....	28
Abb. 1-34: „bluelightprotect Filter“ gemessen für eine Halogenleuchte .....	28
Abb. 1-35: spektrale Lichtverteilung einer <i>OSRAM</i> LED STAR Classic A 40 .....	30
Abb. 1-36: Spektrale Empfindlichkeit der Zapfen des menschlichen Auges (Bildquelle: verändert nach Bowmaker & Dartnall, 1980) .....	32
Abb. 1-37: Kurven der relativen Hellempfindlichkeit des Menschen: Tagsehen $V(\lambda)$ (rot) im Vergleich zum Nachtsehen $V'(\lambda)$ (blau), (CIE Standard Colorimetric Observer Data, 1931) .....	33
Abb. 1-38: Additive Farbmischung .....	34
Abb. 2-1: charakteristisches Spektrum einer Halogenleuchte 40 W / 12 V <i>OSRAM</i> .....	37
Abb. 2-2: Farbwiedergabeindizes einer Halogenleuchte 40 W / 12 V <i>OSRAM</i> , Testfarben definiert nach DIN 6169 .....	38
Abb. 3-1: Pflanzenbeleuchtung (links Tageslichtleuchte, rechts Pflanzenlichtleuchte) .....	41
Abb. 3-2: Mini-Buck .....	45
Abb. 3-3: neun Mini-Bucks auf einer Platine .....	45
Abb. 3-4: Tastverhältnis $t_1$ zu $t_2$ .....	45
Abb. 3-5: DMX-LED-Dimmer X9 HR .....	46
Abb. 3-6: „USB-DMX512 PRO“-Controller .....	47
Abb. 3-7: Komponenten der Lichtsteuerung .....	48
Abb. 4-1: Übersicht Farbverteilung der LEDs .....	51
Abb. 4-2: Leuchtenträger mit verschiedenen LEDs .....	51
Abb. 5-1: Ulbricht-Kugel .....	54
Abb. 5-2: Spektrometer MK350S der Firma <i>UPRtek</i> .....	54
Abb. 5-3: grafische Darstellung der LED-Anordnung auf dem Leuchtenträger ( $d =$ 190 mm) .....	56
Abb. 5-4: Aluminiumplatte ( $d = 190$ mm) mit applizierten LEDs .....	57
Abb. 5-5: abgedeckte Aluminiumplatte mit LED-Öffnungen .....	57
Abb. 5-6: Verteilung und Abstände der <i>Colorpeaks</i> der verwendeten LEDs .....	58
Abb. 5-7: Übersicht der <i>Colorpeaks</i> der verwendeten LEDs .....	59
Abb. 5-8: Aufbau der LED-Leuchtensteuerung .....	61
Abb. 5-9: Schaltplan .....	62
Abb. 5-10: Dipschalter zum Einstellen der DMX-Adresse am DMX-Controller, vgl. Abb. 3-5 .....	63
Abb. 5-11: Programmoberfläche von QLC +, Auswahl <i>Input/Output</i> Menü .....	64
Abb. 5-12: <i>Fixture</i> erstellen in QLC + .....	65
Abb. 5-13: QLC + Single Desk Übersicht .....	65
Abb. 5-14: Einstellmöglichkeiten einer Dimmerkurve (Programm PC-Control) ....	66
Abb. 5-15: theoretische Gegenüberstellung LED-Leuchte und Halogenleuchte im spektralen Verlauf .....	67

Abb. 5-16: theoretische Gegenüberstellung LED-Leuchte und Leuchte mit 5800 K im spektralen Verlauf.....	68
Abb. 6-1: Darstellung der Betriebsarten der LED-Leuchte bei ähnlichster Helligkeit.....	70
Abb. 6-2: Übersicht Lichtspektren der LED-Leuchte in fünf untersuchten Betriebsarten .....	71
Abb. 6-3: Farbortverschiebung von 5801 K nach 3134 K.....	72
Abb. 6-4: Warmlaufphase der LED-Leuchte.....	72
Abb. 6-5: Aufbau HGBSK (Querschnitt) .....	73
Abb. 6-6: Messplatz mit der HGBSK.....	73
Abb. 6-7: HGBSK in Betrieb.....	74
Abb. 6-8: Spektraler Verlauf der verschiedenen Beleuchtungs-Kugeln.....	74
Abb. 6-9: Unterschiede der Strahlungsleistung der Beleuchtungs-Kugeln .....	75
Abb. 6-10: Übersicht Lichtspektren der LED-Leuchte (gemessen mit LCD als Filter).....	76
Abb. 6-11: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und der HGBSK.....	77
Abb. 6-12: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und der HGBSK.....	78
Abb. 6-13: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und der HGBSK.....	78
Abb. 6-14: „Low Blue Light Modus“ des Monitors <i>Benq</i> BL2205.....	79
Abb. 6-15: Lichtspektren derselben Betriebsarten der HGBSK und bei selber Helligkeit des <i>Benq</i> BL2205 Monitors .....	80
Abb. 6-16: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors (Betriebsart „Lese-Modus“) und der HGBSK.....	80
Abb. 6-17: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors (Betriebsart „Lese-Modus“) und der HGBSK.....	81
Abb. 6-18: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors (Betriebsart „Lese-Modus“) und der HGBSK.....	81
Abb. 6-19: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und dem iiyama ProLite.....	82
Abb. 6-20: Vergleich der Lichtspektren des iiyama ProLite (Farbtemperatur 5708 K) und der HGBSK.....	82
Abb. 6-21: <i>Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart</i> .....	83
Abb. 6-22: Vergleich <i>Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart</i> : links Nachbau aus Styropor, rechts <i>Benq</i> BL2205 .....	84
Abb. 6-23: <i>Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart</i> Farben im CIE 1931....	85
Abb. 6-24: Vergleich der Lichtspektren von Benq Monitor, Benq Monitor mit f.lux und HGBSK .....	86
Abb. 6-25: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und des Benq Monitors mit f.lux.....	87
Abb. 6-26: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK .....	87
Abb. 6-27: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors mit f.lux und der HGBSK.....	88

Abb. 6-28: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes von Benq Monitor, Benq Monitor mit f.lux und HGBSK .....	88
Abb. 6-29: ZEISS BlueProtect Beschichtung auf Brillengläsern .....	89
Abb. 6-30: Hintergrundbeleuchtungs-Aufbau mit LCD und ZEISS BlueProtect ....	89
Abb. 6-31: Vergleich der Lichtspektren von Benq Monitor, Benq Monitor mit ZEISS BlueProtect Gläsern und HGBSK (ZEISS simuliert).....	90
Abb. 6-32: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und des Benq Monitors mit ZEISS Blue-Protect Gläsern .....	90
Abb. 6-33: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK (ZEISS simuliert) .....	91
Abb. 6-34: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors mit ZEISS Blue-Protect Gläsern und der HGBSK (ZEISS simuliert) .....	91
Abb. 6-35: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes von Benq Monitor, Benq Monitor mit ZEISS Blue-Protect Gläsern und HGBSK (ZEISS simuliert) .....	92
Abb. 6-36: PRiSMA bluelightprotect Bildschirmbrille FREiBURG - AMBER PRO .....	93
Abb. 6-37: Vergleich der Lichtspektren von Benq Monitor, Benq Monitor mit PRiSMA bluelightprotect und HGBSK (PRiSMA simuliert).....	93
Abb. 6-38: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und des Benq Monitor mit PRiSMA bluelightprotect .....	94
Abb. 6-39: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK (PRiSMA simuliert) .....	94
Abb. 6-40: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors mit PRiSMA bluelightprotect und der HGBSK (PRiSMA simuliert) .....	95
Abb. 6-41: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors mit PRiSMA bluelightprotect und der HGBSK (PRiSMA simuliert) .....	95
Abb. 6-42: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes von Benq Monitor, Benq Monitor mit PRiSMA bluelightprotect und HGBSK (PRiSMA simuliert) .....	96
Abb. 6-43: Übersicht einiger gesteuerter Licht-Betriebsarten der HGBSK.....	97
Abb. 6-44: Farbräume im Vergleich HGBSK / Benq Monitor .....	99
Abb. 6-45: Vergleich der Lichtspektren der HGBSK mit und ohne Blaulichtkanäle .....	100
Abb. 6-46: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK („Mode 1“).....	101
Abb. 6-47: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK („Mode 2“).....	101
Abb. 6-48: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK („Mode 3“).....	102
Abb. A-1: Win32 Disk Imager .....	ii
Abb. A-2: PuTTY Konfiguration .....	iii
Abb. A-3: PuTTY Login Shell .....	iii
Abb. A-4: Erfolgreicher Login am Raspberry Pi .....	iv

Abb. A-5: Konfigurationsmenü <i>raspi-config</i> .....	v
Abb. A-6: Auswahl 3 <i>Boot Options</i> .....	vi
Abb. A-7: Auswahl <i>B1 Desktop / CLI</i> .....	vi
Abb. A-8: Auswahl <i>B4 Desktop Autologin Desktop GUI, automatically logged in as 'pi' user</i> .....	vi
Abb. C-1: Remotedesktopverbindung .....	xiii
Abb. C-2: xrdp-Login des Raspberry Pi .....	xiii
Abb. C-3: Remotedesktop des Raspberry Pi mit den zwei Verknüpfungen von QLC + .....	xiv
Abb. C-4: Übersicht Lichtsteuerung der HGBSK in QLC + .....	xiv
Abb. D-1: Hintergrundbeleuchtungs-Aufbau mit LCD .....	xv
Abb. D-2: Veränderung des Lichtspektrums einer LED-Leuchte durch das LCD vom <i>Benq</i> BL2205 .....	xvi
Abb. E-1: Programmoberfläche Datacolor Spyder 5 ELITE.....	xvii
Abb. E-2: Kalibrierung eines Monitors .....	xvii
Abb. F-1: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („Multimedia-Modus“) und der HGBSK .....	xix
Abb. F-2: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („Multimedia-Modus“) und der HGBSK .....	xix
Abb. F-3: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („Multimedia-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-4: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („Web-Surfing-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-5: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („Web-Surfing-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-6: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („Web-Surfing-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-7: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („Office-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-8: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („Office-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-9: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („Office-Modus“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-10: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („blauer Kanal“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-11: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („blauer Kanal“) und der HGBSK .....	xx
Abb. F-12: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („blauer Kanal“) und der HGBSK .....	xx

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Verschiedene Möglichkeiten der Weißlicht-Erzeugung mit LEDs, (Quelle verändert nach Schubert, 2006, S. 346).....	29
Tab. 1-2: Blaulichtanteile im Licht, (Quelle verändert nach: Wunsch 2007) .....	31
Tab. 1-3: Absorbierte Farben und ihre Komplementärfarben, (Quelle verändert nach: Breitmaier & Jung, 2005, S. 709) .....	33
Tab. 3-1: Übersicht der Steuerungsmöglichkeiten .....	44
Tab. 4-1: Daten-Übersicht ausgewählter LEDs .....	50
Tab. 4-2: Leuchten-Typen und ihre Eigenschaften .....	52
Tab. 5-1: Messgenauigkeit bei einer Farbtemperatur von 2856 K und einer Beleuchtungsstärke von 20000 Lux (UPRtek, 2017) .....	55
Tab. 5-2: Kennwerte der verwendeten LEDs .....	59
Tab. 5-3: Übersicht der Anzahl der verwendeten LEDs .....	60
Tab. 5-4: Komponenten und Konfiguration .....	60
Tab. 6-1: Kennwerte LED-Leuchte (gemessen in einer Ulbricht-Kugel bei ähnlicher Beleuchtungsstärke) .....	70
Tab. 6-2: Messergebnisse der LED-Leuchte der HGBSK mit aktiviertem LCD (Farbe Weiß aktiviert) .....	76
Tab. 6-3: Simulation der Blaulicht-Betriebsarten des <i>Benq</i> BL2205 durch die HGBSK .....	79
Tab. 6-4: Color-Rendition Chart (McCamy, Marcus, & Davidson, 1976) .....	84
Tab. 6-5: Übersicht Verbesserung durch die HGBSK .....	88
Tab. 6-6: Übersicht Verbesserung durch die HGBSK .....	92
Tab. 6-7: Übersicht Verbesserung durch die HGBSK .....	96
Tab. 6-8: Übersicht verschiedener Möglichkeiten der Blaulichtreduzierung .....	98
Tab. 6-9: Übersicht Betriebsarten HGBSK .....	100
Tab. D-1: Transmission LCD .....	xv

## Formelverzeichnis

### (1) Formel 1:

$$X = k \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots 16$$

### (2) Formel 2:

$$Y = k \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots 16$$

### (3) Formel 3:

$$Z = k \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots 16$$

### (4) Formel 4:

$$x = \frac{x}{x+y+z} \dots\dots\dots 17$$



**(5) Formel 5:**

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \dots\dots\dots 17$$

**(6) Formel 6:**

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \dots\dots\dots 17$$

**(7) Formel 7:**

$$x + y + z = 1 \dots\dots\dots 17$$

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Maßeinheit
d	Durchmesser	Meter
h	Stunde	3600 Sekunden
I	elektrische Stromstärke	Ampere
E <sub>v</sub>	Beleuchtungsstärke	Lux
P	elektrische Leistung	Watt
R	Widerstand	Ohm
R <sub>a</sub> , R <sub>e</sub>	Farbwiedergabeindizes	
R <sub>f</sub>	Fidelity-Index	
t	Zeit	Sekunde
τ	Impulsdauer	Sekunde
T	Periodendauer	Sekunde
U	elektrische Spannung	Volt
λ	Wellenlänge	
λ <sub>peak</sub>	Wellenlängenmaximum	
V(λ)	Spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges	
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	Normspektralwertfunktionen	
X,Y,Z	Normfarbwerte	
x,y,z	Normfarbwerteanteile	
Γ	Reflexionsfaktor	

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
Abb.	Abbildung
AC	alternating current
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CQS	Color Quality Scale
CRI	Color Rendering Index
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DC	direct current
DMX	Digital Multiplex
HCL	Human Centric Lighting
HDR	High Dynamic Range
HGBSK	Hintergrundbeleuchtungssimulatorkugel
KNX	ein Feldbus (Bussystem)
KSQ	Konstantstromquelle
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
NTSC	National Television Systems Committee
OLED	organic light emitting diode
PuTTY	Terminalemulator
PC	Personal Computer
PWM	Pulsweitenmodulation
QLC	Q Light Controller
QLED	quantum-dot light-emitting diode
REE	Rare Earth Elements
RGB	Rot, Grün und Blau
SIP	Session Initiation Protocol
Tab.	Tabelle
TLCI	Television Lighting Consistency Index
URL	Uniform Resource Locator

---

USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network

## Typografische Konventionen

In dieser Arbeit werden verschiedene Layout-Formate und Schriften verwendet, um die Lesbarkeit des Textes zu erhöhen und unterschiedliche Informationen leichter unterscheiden zu können.

Nachfolgend werden diese erklärt:

- Eigennamen und Firmennamen werden *kursiv* dargestellt,
- Verweise zum Anhang werden in Anführungszeichen gesetzt,
- Codefragmente wie Linux-Befehle und Konfigurationsdateien und Skripten werden, ebenso wie Datei- und Ordernamen, innerhalb des Textes und in Abbildungen in Schreibmaschinenschrift dargestellt,
- URLs kommen in den Literaturverweisen vor. Vor den URLs befindet sich das Datum des letzten Zugriffs auf die Webseite.

# 1 Einleitung

Licht bestimmt unser Leben. Ohne künstliche Beleuchtung ist die Technik unserer Gesellschaft nicht mehr vorstellbar. Viele Bereiche unserer Freizeit und unseres Arbeitslebens spielen sich in und mit künstlichem Licht ab. Die Entwicklung der Beleuchtungstechnik begann schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Die erste Glühlampe wurde vom deutschen Erfinder Heinrich Goebel aus Springe (Abb. 1-1) bereits 1854 konstruiert und zum Leuchten gebracht. Im Jahr 1879 entwickelte Thomas Alva Edison die erste Kohlefadenglühlampe und stellte sie im Rahmen einer internationalen Elektrizitätsausstellung 1881 in Paris vor. Als Edison seine Glühlampe patentieren lässt, verklagte Goebel ihn und gewann. Auch wenn es bis heute fraglich ist, wer wirklich der Erfinder der Glühlampe war, die Massenfertigung von Glühlampen zu Beleuchtungszwecken in allen Bereichen unseres Lebens war nun nicht mehr aufzuhalten (Rohde, 2007).



Abb. 1-1: Inschrift der Göbel-Bastei, Ort: Springe, Deisterpforte

Mit dem Ausbau der Elektrizität insgesamt und der unglaublichen Vielfalt von Einsatz- und Verwendungsmöglichkeiten von Leuchtmitteln stieg die Nachfrage nach Glühlampen außerordentlich. Allerdings hat die herkömmliche Glühlampe nun nach über 130 Jahren aufgrund ihres Wirkungsgrades – nur etwa 5 % ihrer beanspruchten elektrischen Energie wird in Licht umgesetzt – fast ausgedient. Sie muss anderen Leuchtmitteln wie Leuchtstoff-, Halogen- oder LED-Lampen weichen.

Bereits 2007 kündigte Australien als erster Staat an, ab 2010 die Glühlampen zu verbieten und durch effizientere Leuchtmittel zu ersetzen. Im Jahr 2008 folgte die Europäische Union dieser Maßnahme (Europäischen Union, VERORDNUNG (EG) Nr. 244/2009 DER KOMMISSION, 2009). Die stufenweise Abschaffung der Glühlampen verstärkte den Verkauf von Kompaktleuchtstofflampen, was durchaus nicht unproblematisch ist.

Die Kompaktleuchtstofflampen weisen einen gewissen Quecksilberanteil auf und sind deshalb nicht leicht zu entsorgen. Im Falle eines Gasaustritts durch defekte Leuchtkörper können sie sogar zu gesundheitlichen Schäden führen.

Aufgrund dieser Umstände wurde die Entwicklung von LEDs in den letzten zehn Jahren immer weiter vorangetrieben. Die Lichtausbeute, die Helligkeit und die Langlebigkeit der LEDs wurden kontinuierlich verbessert, die Anwendungsmöglichkeiten scheinen nahezu unbegrenzt. Ein großer Bereich für die Verwendung von LEDs ist die Beleuchtung im Eigenheim der Endkunden mit dem Argument der Energieeinsparung. In fast allen Innen- oder Außenbereichen lassen sich LEDs zur dekorativen oder funktionalen Beleuchtung einsetzen. Des Weiteren werden heute fast alle Leuchtmittelformen z. B. in Bürogebäuden oder im Haushalt durch entsprechende LED-Leuchten, meist mit einem integrierten Vorschaltgerät, ersetzt. Diese unterscheiden sich in der Bauform, Lichtleistung und Farbtemperatur. Neu auf dem Markt sind LED-Fadenlampen im Design der Glühlampe, um ein aktuelles Produkt an dieser Stelle zu nennen. Ein weiterer großer Bereich, in dem heute LEDs verwendet werden, ist die Automobilindustrie. Hier werden im zunehmenden Maße alle Leuchtmittel bis hin zum Fernlicht durch LEDs ersetzt. Auch in der Allgemeinbeleuchtung steht für immer mehr konventionelle Lampen Ersatz in Form von LEDs zur Verfügung.

## 1.1 Aufgabenstellung

LEDs werden in vielen technischen Geräten wie Monitoren im Industriebereich (Steuerung von Maschinen, PC-Monitoren, Fernsehern und mobilen Geräten) als LED-Hintergrundbeleuchtung eingesetzt. Die mit dieser Hintergrundbeleuchtung erzeugten Darstellungen erscheinen meistens einwandfrei und sind in Schärfe und Abbildung außerordentlich gut. Allerdings zeigen sich bei vielen Anwendungen auch negative Auswirkungen auf den Nutzer. Es gibt oft spontane Befunde wie Unwohlsein und Stress, aber auch Beschwerden wie zum Beispiel Schlafstörungen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten. Entscheidend für die unterschiedlichen möglichen Auswirkungen ist offenbar das Lichtspektrum und die darin enthaltende hohe Blaulichtemission der verwendeten Beleuchtung (z. B. Cajochen, et al., 2011, vgl. Abschnitt 1.4).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Reduzierung oder Deaktivierung der Blaulichtemission bei der Lichterzeugung zu untersuchen. Die Umsetzung erfolgt mit der Entwicklung und dem Aufbau einer LED-Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum. Mit dieser LED-Hintergrundbeleuchtung wird ein individuelles homogenes Ausleuchten einer

Aktiv-Matrix-Anzeige in Abhängigkeit von Umgebungslicht, Tageszeit, Farbwiedergabe, Lichtstärke und Farbtemperatur erzeugt. Die im Lichtspektrum enthaltene Blaulichtemission kann aktiv reduziert bzw. ganz verhindert werden. Die Idee ist die allgemeine Verwendung von Leuchten-Systemen in alltäglicher Anwendung zunächst in einer Übersicht unabhängig von technischen Details in Kapitel 1.2 darzustellen und ihre technischen Details in Kapitel 1.3 abzuhandeln.

## 1.2 Aktuelle Leuchten-Systeme

In allen Bereichen des täglichen Lebens, sowohl im Consumer-Bereich als auch vor allem in der Industrie und im technisch-wissenschaftlichen Bereich, werden zunehmend neue Konzepte für die Verwendung von LEDs in der Beleuchtungstechnik entwickelt und realisiert. Angesichts der Vielzahl der Leuchtsysteme auf Basis der LED-Technik, die bereits auf dem Markt zu finden sind, seien hier stellvertretend einige wichtige Beispiele genannt.

In der Medizintechnik in Krankenhäusern gibt es Anwendungen für die Beleuchtung von Räumen zur Verbesserung des Wohlbefindens der Patienten und zur Beschleunigung des Heilungsprozesses. Für den Operationssaal wurden spezielle Operationsleuchten mit LEDs entwickelt (Abb. 1-2), die mit einer steuerbaren Helligkeit, allerdings mit fixem Farbspektrum, in ganz unterschiedlichen Einsatzbereichen die Arbeit der Ärzte unterstützen.



Abb. 1-2: OP-Beleuchtung

Die Straßenbeleuchtung wird heute ebenfalls optimiert und mit energieeffizienten LED-Leuchten inklusive innovativer Steuerung zur Wartung und Überwachung ausgestattet (V., 2016, S. 121).

Die Hochdruckentladungslampen, Quecksilberdampflampen (HQL) und Halogen-Metall-dampflampen (HQI) sind seit April 2015 nicht mehr konform mit der Europäischen Richtlinie (Europäischen Union, VERORDNUNG (EG) Nr. 245/2009 DER

KOMMISSION, 2009). Ab 1. Januar 2017 dürfen keine Leuchtmittel dieses Typs mit einer Lichtausbeute von weniger als 80 Lumen pro Watt mehr in Verkehr gebracht werden. Dieser Leuchtentyp wird überwiegend für Außen- und Straßenbeleuchtung eingesetzt. Mit dem Austausch defekter alter Leuchtentypen durch neue Leuchtmittel verändern sich die nächtlichen Straßenbilder. Zum Beispiel können so Fußgängerüberwege sehr hell ausgeleuchtet werden, da hier immer häufiger LEDs zum Einsatz kommen.

Auch in der Veranstaltungstechnik wird z. B. die Theaterbeleuchtung in zunehmenden Maße durch LED-Scheinwerfer ersetzt (Greule, 2014, S. 131). Damit wird die Hitzeentwicklung der Leuchte stark reduziert, und die Bühnendarsteller müssen nicht mehr der hohen Strahlungswärme ausgesetzt sein. Die Verringerung der Strahlungswärme ist auf das Lichtspektrum der LEDs zurückzuführen, da hier kein bedeutender Infrarotanteil vorhanden ist.

Auch in Büroräumen und Fluren werden vermehrt LED-Beleuchtungssysteme zur professionellen Beleuchtung eingesetzt.

Die *üsttra Hannoversche Verkehrsbetriebe* in Hannover haben ihre neuen Straßenbahnen TW3000 ebenfalls mit RGB-LEDs (Rot, Grün und Blau) ausgerüstet, um mit einer farbigen Innenraumbeleuchtung eine Wohlfühlatmosphäre zu schaffen. In der Luftfahrtindustrie macht es die Firma *Airbus* ähnlich und baut sogenannte Ambientebeleuchtungen in die Flugzeugkabinen ein (AIRBUS, 2016). Hiermit können durch unterschiedliche Beleuchtungszustände Kabinenatmosphären erzeugt werden. So kann zum Beispiel durch Veränderung der Farbtemperatur ein Tagesverlauf simuliert oder durch Simulation von Sonnenauf- oder Sonnenuntergang dem Jetlag entgegengewirkt werden.

Im Automobilbereich werden in fast allen Beleuchtungsanwendungen wie Tagfahrlicht, Scheinwerfer und sogar Fernlicht die energiesparenden und zuverlässigeren LEDs eingesetzt.

Auch im Consumer-Bereich nehmen LCDs mit LED-Hintergrundbeleuchtung einen immer größeren Stellenwert ein. Monitore, Notebooks, Handys und Digitalkameras verfügen heutzutage fast nur noch über eine LED-Hintergrundbeleuchtung.

Bei der Auswahl von Leuchtmitteln ist eine ganze Reihe von Faktoren maßgebend. Folgende Vorteile sprechen für den Einsatz von LEDs in Beleuchtungssystemen:

- Langlebigkeit (teilweise 40.000 h und länger sind angestrebt),
- extreme Lichtausbeute (gemessen in lm/W), die wesentlich höher ist als die von herkömmlicher Beleuchtung,



- kleinere Bauform der Leuchtmittel, dadurch sind neue Beleuchtungskonzepte möglich,
- Regelung durch digitale Ansteuerung,
- vielfältige Einsatzmöglichkeiten,
- geringer Stromverbrauch,
- keine Einschaltverzögerung.

Nachteile:

- oft kein Tausch einzelner Leuchtmittel möglich (Reparierbarkeit),
- punktuell große Wärmeentwicklung,
- teilweise störender Flimmereffekt,
- eingeschränkte Farbwiedergabe,
- Rohstoffbeschaffung und Recycling (Metalle der Seltenen Erden).

Für die Darstellung eines tagesähnlichen Lichtverlaufs gibt es mehrere Systeme auf dem Markt (siehe Kapitel 1.3). Alle diese Systeme bilden den Sonnenlichtverlauf nach und können individuell programmiert oder vom Benutzer gesteuert werden. Allerdings wird der Blaulichtanteil der LEDs bei diesen Systemen nicht gesteuert. Die damit verbundenen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus werden nicht berücksichtigt. Der hohe Blaulichtanteil der LEDs wird mit der vorliegenden Arbeit im Bereich der Monitorhintergrundbeleuchtung analysiert, und auf dieser Grundlage eine Blaulicht-Steuerung für Monitore realisiert.

## 1.3 Stand der Technik

Dieses Kapitel zeigt eine Übersicht über die aktuellen Leuchttechniken (Abb. 1-3). Zunächst wird auf den Bereich der „sonnenlichtähnlichen Leuchten“ eingegangen. Dazu werden vier Beispiele aufgezeigt und kurz erläutert. Anschließend wird im zweiten Teil des Kapitels die Hintergrundbeleuchtung speziell für den Displaybereich erörtert. Es werden die verschiedenartigen Display-Typen und Backlights behandelt. Der Bereich der LED-Backlights wird an dieser Stelle detaillierter dargestellt, da das Ziel dieser Arbeit die Optimierung der Hintergrundbeleuchtung ist. Für die Hintergrundbeleuchtung gibt es vier verschiedene Typen und zahlreiche Bauformen die hier berücksichtigt werden. Des Weiteren werden aktuelle Patente, die sich mit der Beleuchtungstechnik und speziell mit den Fragestellungen dieser Arbeit beschäftigen, aufgelistet, erläutert und die Abgrenzung zu dieser Arbeit aufgezeigt.

Am Ende des Kapitels 1.3 werden einige Software-Lösungen zur Steuerung der Hintergrundbeleuchtung vorgestellt.

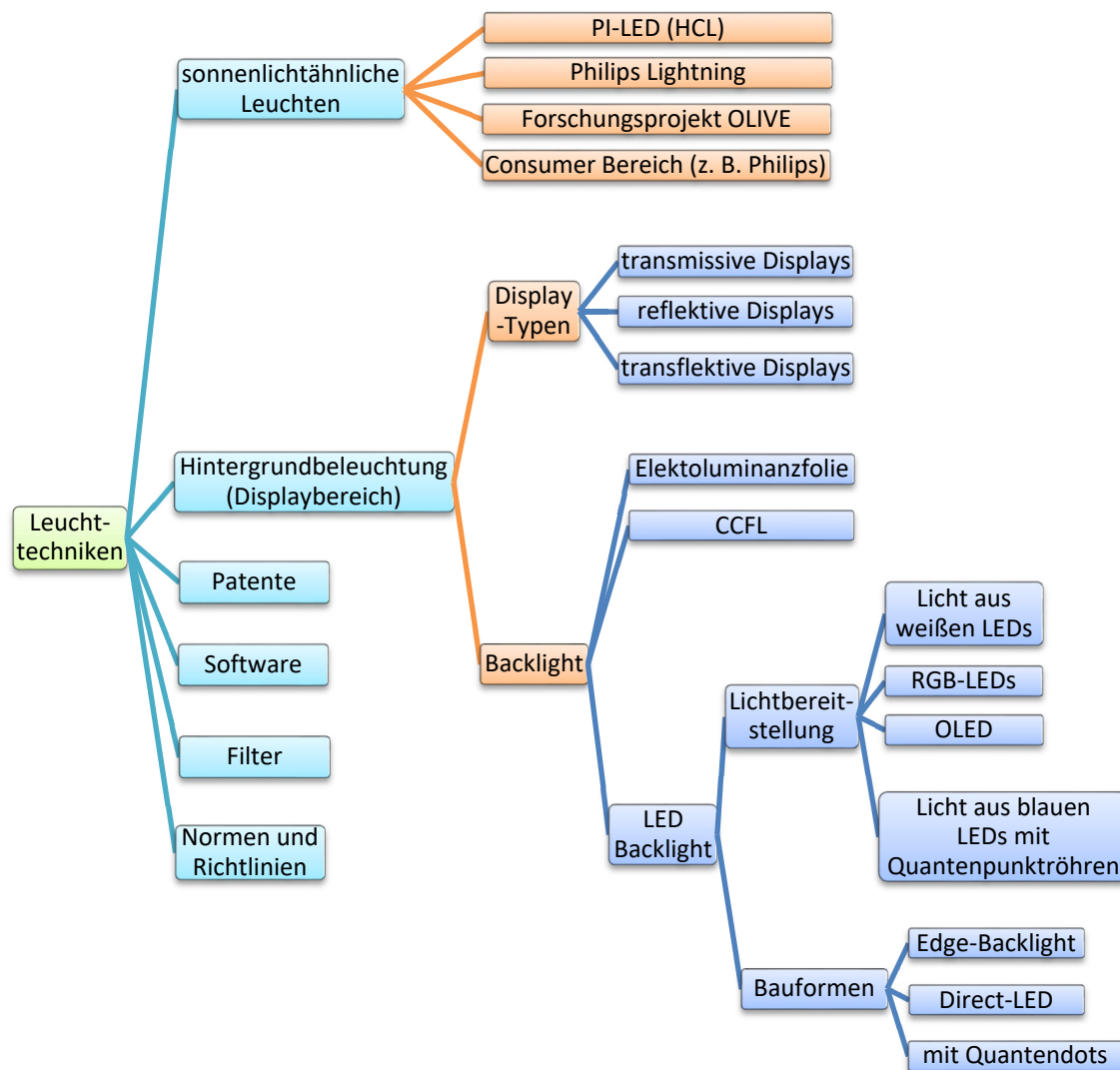


Abb. 1-3: Übersicht zum Stand der Technik

Die Sortimentsauswahl der Beleuchtungsindustrie ist außerordentlich vielfältig. Fast alle Hersteller verwenden für die Hintergrundbeleuchtung LED- oder OLED-Technik (*Organic Light Emitting Diode*). Da die Beschreibung der außergewöhnlichen Vielzahl von Beleuchtungssystemen den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde, werden entsprechend dem Schwerpunkt der Arbeit tageslichtähnliche Systeme gewählt. Dabei werden die am Markt verfügbaren tageslichtähnlichen Beleuchtungssysteme und die entsprechenden Hintergrundbeleuchtungsarten von Bildwiedergabegeräten berücksichtigt.

Die Lichtindustrie hat sich der Aufgabe gestellt, Licht zu erzeugen, welches den Bedürfnissen des Menschen am nächsten kommt und dessen Wohlbefinden steigern soll. Dazu wurde der neue Begriff „HCL“ (*Human Centric Lighting*) kreiert (VDI Wissensforum GmbH, 2015, S. 73 ff.).

Zurzeit kann z. B. mit der PI-LED der Firma *LUMITECH*, die aus mehreren LEDs verschiedener Farben hergestellt ist, der Sonnenverlauf nachempfunden werden. Damit reiht sich diese Leuchte in die HCL-fähigen Leuchten ein (LUMITECH, PI-LED, DOWNLIGHT SYSTEM - ZHAGA, 2016).

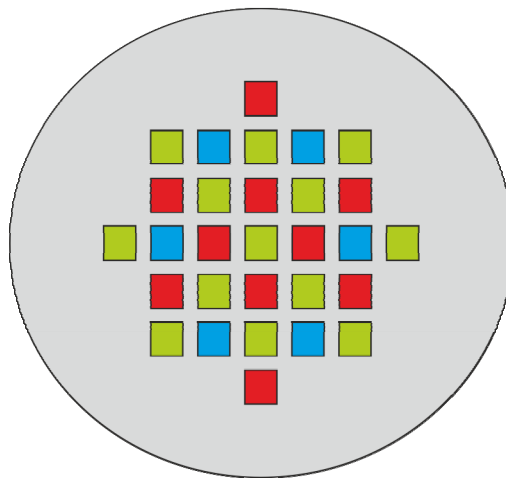


Abb. 1-4: PI-LED, schematische Anordnung der LEDs

Das PI-LED System ist aus drei verschiedenen LEDs (blau, rot und hellgrün) aufgebaut (Abb. 1-4). Dadurch wird ein HCL simuliert, welches einen sehr hohen Farbwiedergabeindex  $R_a$  (englisch *Color Rendering Index*)  $> 90$  und eine große Dynamik der Farbtemperatur (2500 K – 7000 K) aufweist (ebd.). Der Farbwiedergabeindex wird im Kapitel 2 Abschnitt 2.1 erläutert. Bei der Stromversorgung der LEDs kommt es zu Wärmeentwicklung auf der Leiterplatte und direkt an den LEDs. Durch diese Wärmeentwicklung kann es bei den LEDs zu einem Farbdrift (Farbverschiebung) kommen. Deshalb ist auf dem LED-Board ein Temperatursensor angebracht, der die Temperatur der LEDs als Input für die Nachregelung der Stromversorgung der LEDs liefert. Die PI-LED ist außerdem über DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) ansteuerbar und infolgedessen auch für ganz unterschiedliche Büroarbeitsumgebungen einsetzbar. Das DALI-Leuchten-Steuerungsprotokoll wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit thematisiert.

Mit dem *Philips Lighting System* kann ebenfalls ein tagesähnlicher Lichtverlauf simuliert werden. Einsatzgebiete sind Büroumgebungen, Industrie, Einzelhandel, Gastronomie und öffentliche Bereiche, wie z. B. im Bildungswesen.

Das speziell für Schulen entwickelte *Philips Lighting System* (SchoolVision,) besteht aus mehreren unterschiedlichen Leuchtstoffröhren (kalt- und warmweiße Lichtquellen). Durch das gezielte Ansteuern der Leuchtstoffröhren kann eine Farbtemperatur entsprechend dem Tageslichtverlauf gewählt werden. Die angepasste Beleuchtung soll ein effektiveres Lernen ermöglichen. Eine Studie (Wessolowski, 2014) des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf hat folgendes Resultat ergeben:

- Rückgang der Fehlerhäufigkeit -44,9 %,
- Zunahme der Leseleistung +34,8 %,
- Abnahme hyperaktiven Verhaltens (Unruhe) -76,6 % (PHILIPS, Projektbericht Schulbeleuchtung, 2016).

Ein Beispiel für eine innovative neuartige Beleuchtung zeigt Abb. 1-5,



Abb. 1-5: moderne Beleuchtung im Bildungsbereich

Im Jahre 2014 wurde das Forschungsprojekt OLIVE stehend für *Optimierte Lichtsysteme zur Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Gesundheit* (BMBF, 2014) ins Leben gerufen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt beschäftigt sich seit Juli 2014 mit der Entwicklung einer Human Centric Lighting Lösung für den Büroalltag. Es sind mehrere Projektpartner vertreten. Das Fachgebiet Lichttechnik an der TU Ilmenau beschäftigt sich in Kooperation mit *OSRAM* mit den Farbsensoren. Ein Farbsensor soll in die Leuchte integriert werden und alle Farben des LED-Panels messen. Aus einem Lichtleiter und der Optik des LED-Panels soll ein Farbmesssystem entstehen. Frühestens Ende Juni 2017 (Projektende) ist mit ersten Ergebnissen im Forschungsprojekt OLIVE zu rechnen<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Aussage von Herrn Horst Rudolph, OLIVE Koordinator

Im Consumer-Bereich werden ebenfalls sonnenverlaufsähnliche Leuchten (Abb. 1-6), wie z. B. die Sonnenlicht-Weckleuchte von *Philips* mit Sonnenaufgangsfunktion, digitales FM Radio verwendet. Mit dieser LED-Leuchte kann der Benutzer mit einer Sonnenaufgangssimulation geweckt werden.



Abb. 1-6: Sonnenlicht-Weckleuchte

Für eine optimierte Leistungsfähigkeit im Alltag kann blaues Licht zur Therapie und Leistungssteigerung eingesetzt werden (Abb. 1-7). Diese Leuchte emittiert blaues Licht, welches die Ausschüttung des Hormons Melatonin unterdrücken kann. Melatonin reguliert im Körper den Tag-Nacht-Rhythmus (Deutsche Gesundheitshilfe e.V., 2014). Durch die Unterdrückung von Melatonin, z. B. am Abend, bleibt der Benutzer länger wach.



Abb. 1-7: Einsatz von blauem Licht zur Leistungssteigerung

Dieser Überblick zeigt, wie vielfältig die Anwendungsgebiete der Lichttechnik sind, und welche verschiedenen Bereiche berührt werden. Es wird versucht, alle denkbaren

Beleuchtungssituationen mit Hilfe von neu konstruierten Leuchttechniken nachzuempfinden. Die Vor- und Nachteile werden im Kapitel 1.4 beschrieben.

Die **Display-Typen** lassen sich in Größe, Typ und Verwendungsart kategorisieren. Eine Gruppe stellen die sogenannten *transmissiven*<sup>2</sup> Displays dar (Abb. 1-8). Diese sind rund um den Globus weit verbreitet. Die Lichtquelle wird hinter dem Display angebracht. Als Quelle dienen beispielsweise Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen, LEDs oder Elektrolumineszenz-Folie. Das LCD wird nur von hinten beleuchtet. In abgedunkelten Räumen lässt sich diese Art von Display optimal ablesen, während diese bei hellen Lichtverhältnissen verblassen, da das einfallende Licht die Lesbarkeit erschwert (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 457).

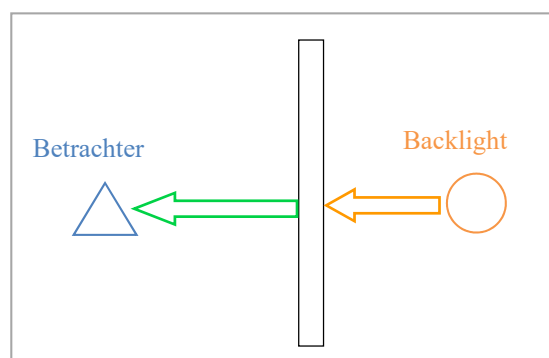


Abb. 1-8: Funktionsweises eines transmissiven Displays

**Reflektive Displays** (Abb. 1-9) machen sich das Umgebungslicht zu Nutze. Das Licht durchdringt das Display von vorne und wird von einem Spiegel, der sich hinter dem Display befindet, zurückgeworfen. Reflektive Displays sind daher nur bei hellem Licht einsetzbar, da im Dunkeln die Anzeige nur schwer erkennbar ist. Häufig wird das Problem in der Praxis durch den Einsatz eines Frontlichts behoben, sodass auch bei schlechten Lichtverhältnissen das Display abgelesen werden kann. Diese Displays sind einfach herzustellen und dadurch kostengünstig (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 457).

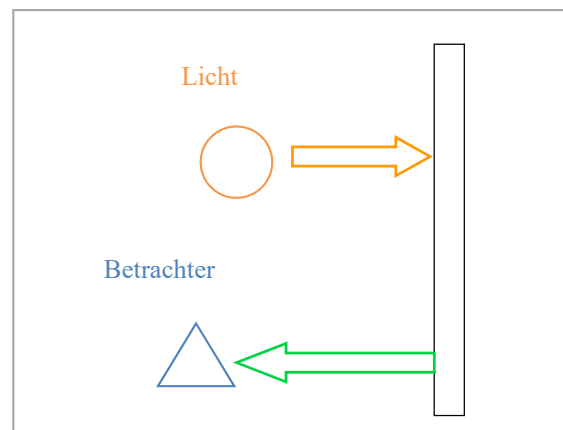


Abb. 1-9: Funktionsweise eines reflektiven Displays

<sup>2</sup> lat. *trans* = durch, *mittere* = schicken

**Transflektive Displays** (Abb. 1-10) hingegen besitzen eine eingebaute Hintergrundbeleuchtung und nutzen zusätzlich das Umgebungslicht. Die Hintergrundbeleuchtung durchdringt einen halbtransparenten Spiegel und beleuchtet das Display von hinten. Das Umgebungslicht durchdringt das Display, wird dann vom Spiegel reflektiert und beleuchtet das Display zusätzlich von hinten. Transflektive Displays ergänzen sich daher im Zusammenspiel von transmissiven und reflektiven Beleuchtungsverfahren. Aus diesem Grund lässt sich ein solches Display bei allen Lichtverhältnissen relativ gut ablesen. Es erreicht jedoch bei viel Umgebungslicht nicht die Helligkeit eines rein reflektiven Displays und bei wenig Umgebungslicht nicht die Helligkeit eines rein transmissiven Displays (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 457).

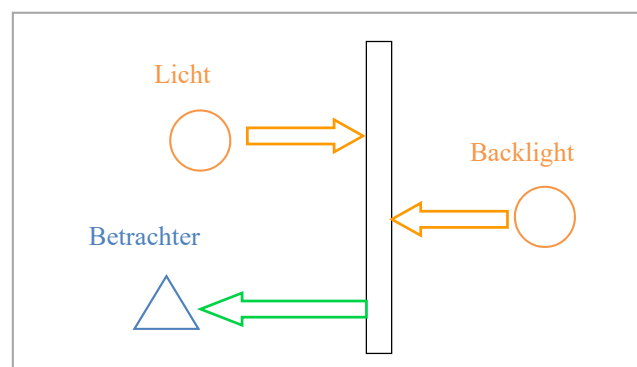


Abb. 1-10: Funktionsweise eines transflektiven Displays

Entscheidend bei der Hintergrundbeleuchtung ist die Konstruktion der Lichtführung, wie nachfolgend gezeigt wird.



Die Funktionsweise von drei Backlight-Modellen stellt sich folgendermaßen dar:

### Backlight mit Elektrolumineszenz-Folie

Kleine LCD-Anzeigen, wie sie z. B. in SIP-Telefonen (*Session Initiation Protocol*) der Universität Hildesheim (Abb. 1-11) verwendet werden, beinhalten häufig Elektrolumineszenz-Folien.

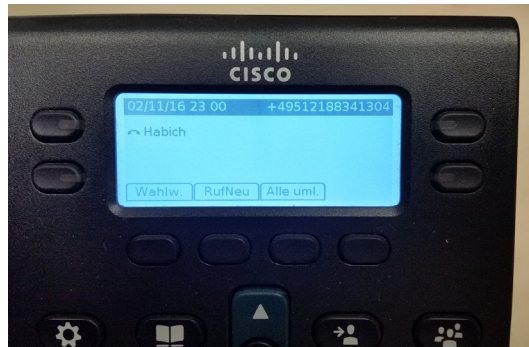


Abb. 1-11: SIP-Telefon, CISCO CP-6945

Diese Leuchtfolien besitzen folgende Vorteile:

- Robustheit,
- Langlebigkeit,
- geringe Leistungsaufnahme.

Ein Nachteil dieser Leuchtfolien ist die geringe Lichtausbeute.

Aufgebaut sind Leuchtfolien wie folgt: Sie bestehen aus zwei leitenden Schichten, einer transparenten Elektrode und der reflektierenden Metallelektrode (Abb. 1-12). Zwischen diesen beiden Elektroden befinden sich die Elektrolumineszenz-Schicht und der Isolator. Die Leuchtfolie hat eine Gesamtdicke von  $\leq 1$  mm (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 457-459).

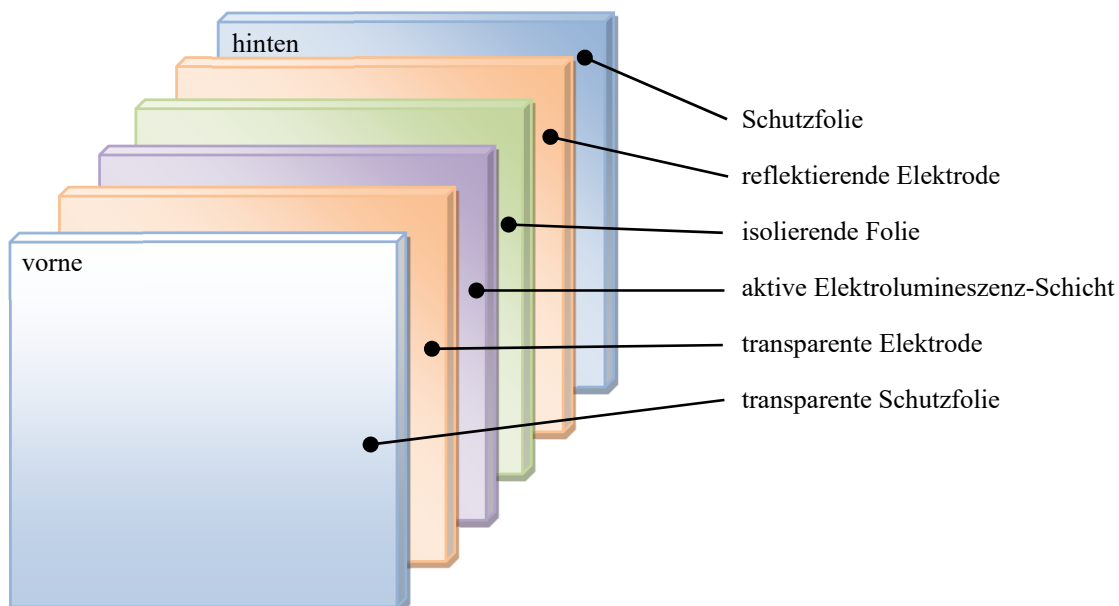


Abb. 1-12: Schichtaufbau einer Leuchtfolien



### Backlight mit Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen (Kaltkathodenröhren)

Der Standard der Hintergrundbeleuchtungen bei LCD-TV-Geräten und PC-Monitoren war bis vor einigen Jahren die Verwendung von Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen (*Cold Cathode Fluorescent Lamp* (CCFL)). Diese Röhren sind aufgrund ihres Quecksilbergehalts als bedenklich einzustufen. Bei Zerstörung der Röhre kann das Quecksilber in die Umwelt gelangen. Daher sind alte CCFLs bzw. die Geräte, in denen diese Röhren vorhanden sind, als Sondermüll zu behandeln und aufwendig zu entsorgen.

Ein CCFL-Backlight besteht aus vielen Leuchtröhren (Abb. 1-13). Mit zunehmender Bildschirmgröße steigt die Leistungsaufnahme der Leuchtröhren, ein Grund dafür, dass in immer mehr Bildschirmen die Hintergrundbeleuchtung durch LED-Technik ersetzt wird.



Abb. 1-13: Hintergrundbeleuchtung mit CCFL

In einer Wanne hinter der LCD-Matrix und der Diffusorscheibe aus einem transparenten weißen Kunststoff befinden sich die CCFLs. Die Wanne ist so geformt, dass die entstehende Wärme gut abgeführt werden kann. Sie sollte daher senkrecht betrieben werden, um einen Hitzestau zu vermeiden. Zu große Hitze kann zur frühzeitigen Alterung der Röhren führen (KOMPENDIUM, o. J.).

Die Lebensdauer von CCFLs beträgt bis zu 60.000 Stunden (NEC Lighting, Ltd, 2016). In den CCFLs ist gasförmiges Quecksilber enthalten. Je mehr Quecksilber verwendet wird, desto haltbarer sind CCFLs. Dieses wird im Betrieb durch den Strom ionisiert und gibt UV-Licht ab. Das UV-Licht wird durch die Leuchtschicht der CCFL in sichtbares Licht umgewandelt. Je nach Bauart der CCFLs hängen die Betriebszeit und die Helligkeit von verschiedenen Faktoren, wie z. B. zu hohen Spannungen, mangelhafter Isolation oder der Menge des Quecksilbers der Amalgambeschichtung an den Innenflächen der CCFLs, ab. Liefert eine CCFL nur noch eine Leuchtkraft von 50 % des ursprünglichen Wertes, sind diese in der Regel als „verbraucht“ einzustufen, und das Lebensdauerende gilt als erreicht.

Heute werden immer mehr Geräte mit LED-Hintergrundbeleuchtungen hergestellt. Daraus ergibt sich allerdings auch ein neues Problem. LEDs enthalten in der Regel Metalle der Seltenen Erden. Da diese *Rare Earth Elements* meist in sehr kleinen Mengen

in LEDs enthalten sind, können sie nur schwierig oder heutzutage fast gar nicht recycelt werden. Der „Beleuchtungsabfall“, der durch den Gebrauch von LEDs entsteht, wird in den nächsten Jahren weiter wachsen. Zu dem Umgang mit seltenen Erden gibt es zwar Richtlinien, Normen und Gesetze, wie zum Beispiel die Einführung von RoHS: *Restriction of Hazardous Substances* (European Commission, DIRECTIVE 2011/65/EU, 2011) und WEEE: *Waste Electrical & Electronic Equipment* (European Commission, DIRECTIVE 2012/19/EU, 2012), aber ob diese bereits ausreichen, um die Kreislaufwirtschaft von LEDs ökologisch sinnvoll zu gestalten, wird sich zeigen. Man kann davon ausgehen, dass LEDs nicht ganz ungefährlich für die Umwelt sind. Elemente wie Blei, Silber, Gold, Nickel und Arsen werden je nach Anforderungen verwendet. Je heller eine LED leuchtet, umso mehr Kupfer, Nickel und Eisen sind in ihr enthalten. Zum Beispiel schaden Kupfer und Nickel dem Ökosystem, wenn sie in den Boden gelangen. Nach dem kalifornischen „standard toxicity leaching test“ wird die Schädlichkeit z. B. von bedrahteten LEDs in Farben aufgeteilt. Weiße und gelbe LEDs sind geringfügig belastet und z. B. rote sehr belastet (Seong-Rin, Kang, Ogunseitan, & Schoenung, 2011).

## LED-Backlight

Die Verwendung von LEDs als Ersatz von CCFLs scheiterte bis vor einigen Jahren an den Herstellungskosten. Bei der Fertigung von LEDs waren die Toleranzen innerhalb einer Fertigungscharge relativ groß. Sollen LEDs also für eine gleichmäßige Hintergrundbeleuchtung eingesetzt werden, dürfen diese untereinander nur eine sehr geringe Abweichung in Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur besitzen. Displays benötigen z. B. für das *Edge Backlight* (LEDs sind in Zeilen seitlich im Display angebracht) viele identische LEDs. Durch neue Herstellungsverfahren und Werkstoffe können immer besser gleichfarbige LEDs gefertigt werden. Dadurch können LED-Hintergrundbeleuchtungen in großen Mengen produziert werden und in immer mehr Anwendungen zum Einsatz kommen. Weitere Vorteile bestehen darin, dass LED-Backlights kein Quecksilber enthalten, 40 % geringere Energieaufnahme gegenüber einem CCFL-Backlight aufweisen und eine längere Lebensdauer besitzen. Außerdem kann durch LEDs ein größerer Farbraum angezeigt werden (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 463-464). Dieser Farbraum wird durch die Normfarbtafel der CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) abgebildet (Abb. 1-14). Dieses genormte Diagramm zeigt alle für den Menschen sichtbaren Farben. Der Weißpunkt befindet sich in der Mitte. Von dem Weißpunkt aus werden alle Farbtöne auf einer Line dargestellt. Die Intensität einer Farbe (Farbsättigung) nimmt von innen nach außen zu. Die Farbhelligkeit kann man aus diesem Diagramm nicht entnehmen. Die theoretischen Farben liegen außerhalb der spektralen Ortskurve und können mit dem menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden. Die Farbachsen der CIE 1931-Farbtafel stellen die Normfarbwerteanteile  $x$  und  $y$  dar.

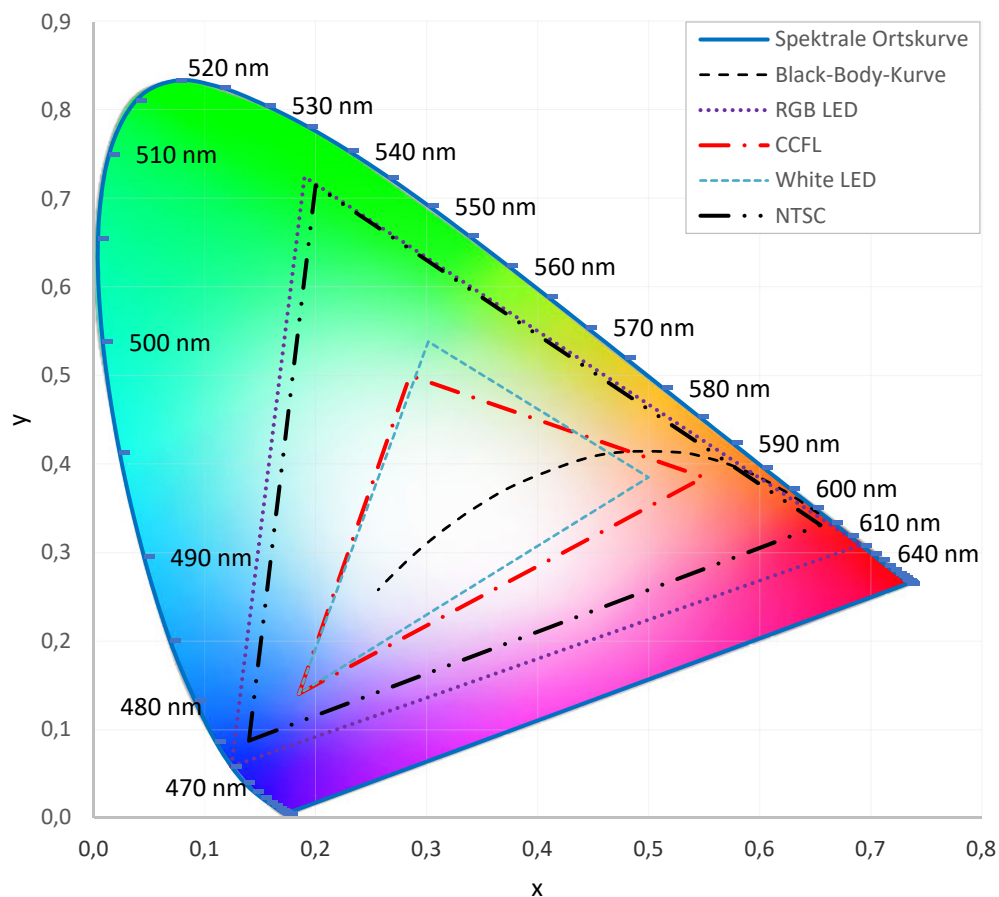


Abb. 1-14: CIE-Normfarbtafel mit eingezeichnetem NTSC-, RGB-LED-, White LED- und CCFL Farbraum (Quelle verändert nach powerelectronics, 2016)

Mit dem von CCFLs erzeugten Licht ist eine annähernde Wiedergabe des sRGB-Farbraums möglich. Grün-, Rot- und Gelbtöne werden nicht richtig wiedergegeben. Der Grund liegt am Lichtspektrum einer CCFL (Abb. 1-15). Der für den Menschen sichtbare Teil des Lichtspektrums liegt im Wellenlängenbereich von ca. 380 – 780 nm. Die Farbe Weiß besteht aus vielen verschiedenen Wellenlängen. Für eine exakte Darstellung aller Farben sind die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau erforderlich (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 454-456). Durch die Farbmischung der Primärfarben kann jede andere Farbe in der oben dargestellten CIE-Normfarbtafel eingestellt werden.

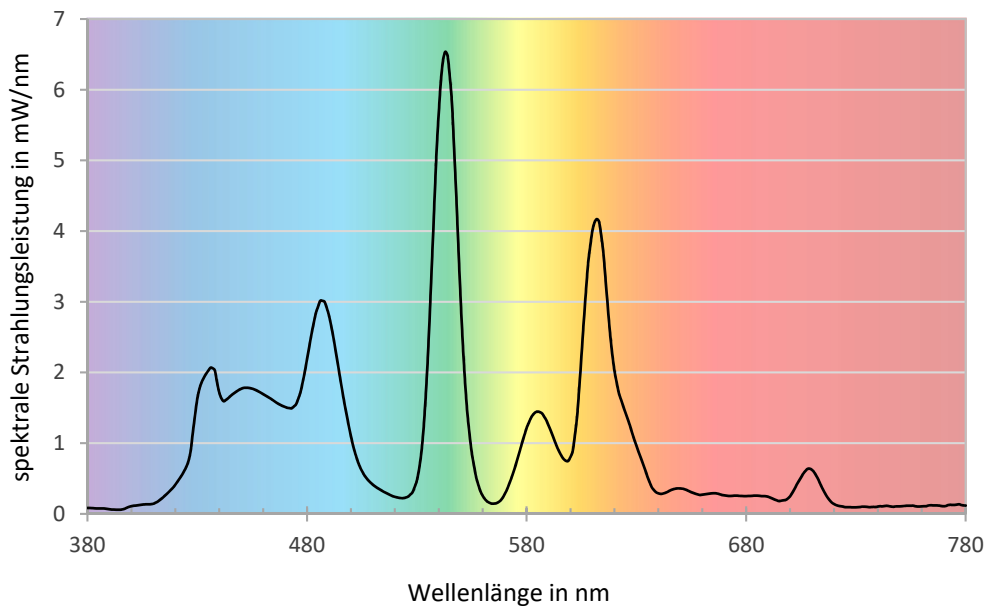


Abb. 1-15: Spektrum einer Hintergrundbeleuchtung mit CCFL (Monitormodell: iiyama B2409HDS)

Die Koordinaten  $x, y, z$  für die CIE-Normfarbtafel werden wie folgt bestimmt:

Die spektrale Verteilung des gemessenen Lichts wird mit den drei Normspektralwertfunktionen (Abb. 1-16) multipliziert und anschließend aufsummiert, woraus sich die drei Normfarbwerte  $X, Y$  und  $Z$  ergeben:

$$X = k \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$k = \text{Normierungsfaktor}, S(\lambda) = \text{spektrale Verteilung}$

$S(\lambda)$  wird in der Regel in Schritten von 1 oder 10 nm messtechnisch erfasst.

„Unter der Voraussetzung einer linearen Bewertung durch das menschliche Auge läßt sich ein Farbreiz allein durch die relative spektrale Verteilung der auf die Retina auftreffenden Strahlung beschreiben. Die sog. Farbreizfunktion  $\varphi(\lambda)$  ist für Selbstleuchter gleich der relativen Verteilung  $S(\lambda)$  der emittierten Strahlung.“ (Kohlrausch, 2013, S. 220)

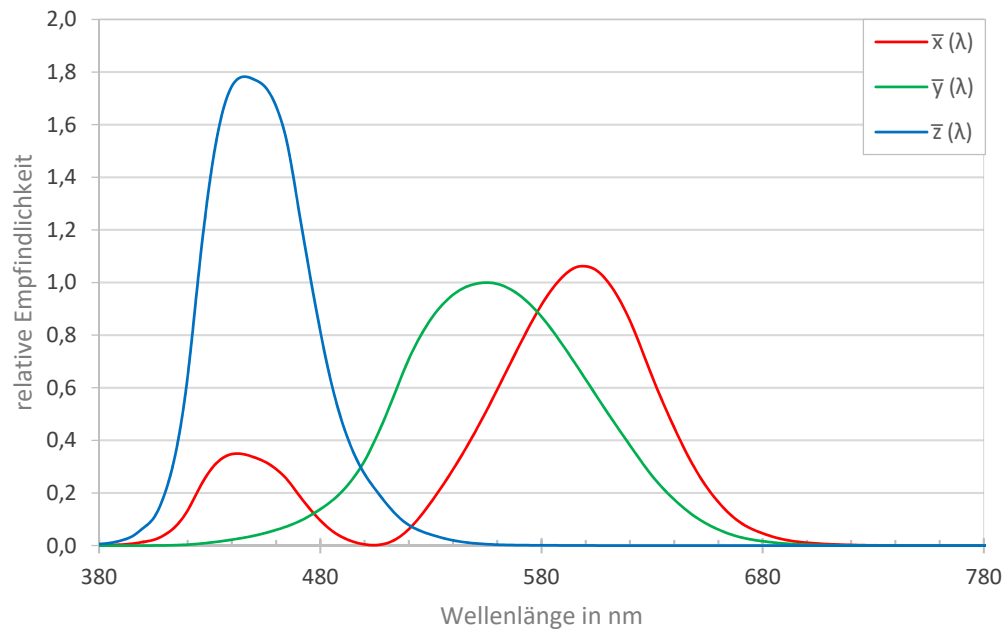


Abb. 1-16: Normspektralwerte CIE 1931 (CIE Standard Colorimetric Observer Data, 1931)

Aus den Normfarbwerten werden die Normwertanteile bestimmt, die beliebigen Konstanten  $k$  entfallen dabei:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (6)$$

$$x + y + z = 1 \quad (7)$$

Damit alle Farben exakt dargestellt werden, ist eine relativ genaue Wellenlänge der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau erforderlich. Die schmalbandigen Farbfilter eines LCDs müssen dementsprechend ausgeführt sein, um eine additive Farbmischung der drei Primärfarben zu ermöglichen (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 459). In Abb. 1-17 ist das Spektrum einer weißen LED für eine Hintergrundbeleuchtung und die drei Farbfilter (*Color Filters*) dargestellt.

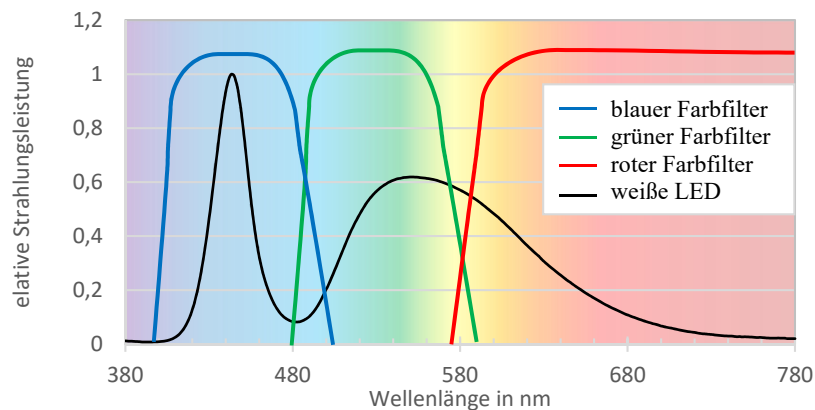


Abb. 1-17: Spektrum einer weißen LED einer Hintergrundbeleuchtung und die Kennlinien der Rot-, Grün- und Blau-Filter einer LCD-Matrix

Das führt dazu, dass die Farbsättigung nur eingeschränkt dargestellt wird. Erst durch die LED-Hintergrundbeleuchtung ist eine Abstimmung der Wellenlängen der LEDs auf die Farbfilter eines LCDs möglich. Die exaktere Abstimmung der Primärfarben durch die schmalbandigen Farbfilter des LCDs ermöglicht einen größer abgedeckten Farbraum mit LED-Hintergrundbeleuchtung als mit CCFLs (Abb. 1-14). Durch die verbesserte Farbwiedergabe können LED-Anzeigegeräte beispielsweise im professionellen oder Consumer-Bereich eingesetzt werden. Durch die neue LED-Hintergrundbeleuchtung wirken die Farben brillanter (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 459).

Die Firma *SHARP* hat eine innovative LCD-Matrix mit einem weiteren gelben Farbfilter entwickelt. (Abb. 1-18).

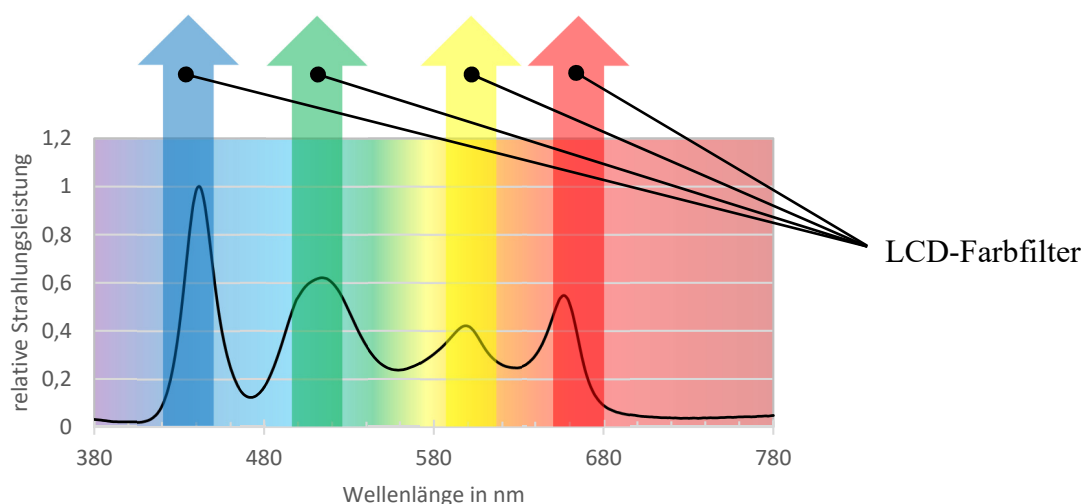


Abb. 1-18: Erweiterung der LCD-Matrix durch einen weiteren gelb-Filter (schematische Darstellung)

Durch diese Erweiterung (mehr Gelblichtanteile) und dem etwas vergrößerten Farbraum im grünen und gelben Bereich soll das darzustellende Bild auf dem Monitor heller und kontrastreicher wirken (Abb. 1-19).

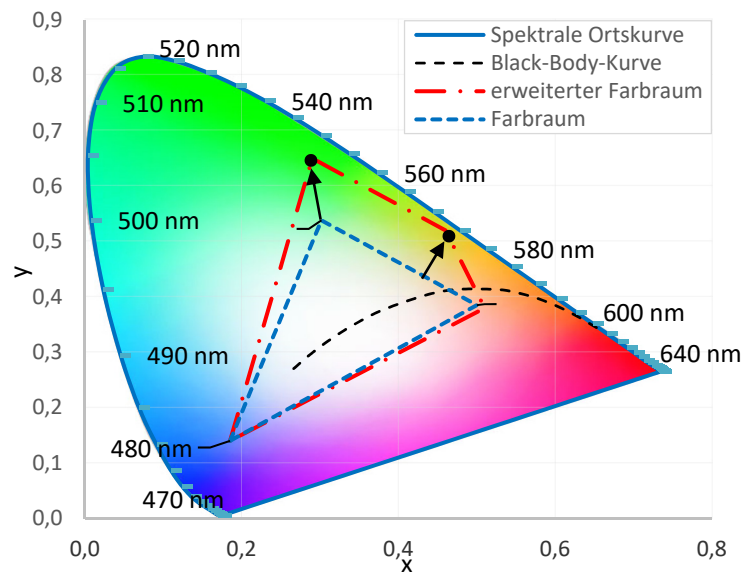


Abb. 1-19: Erweiterung des Farbraums

Es gibt **vier LED-Backlight-Typen**. Diese unterscheiden sich in folgenden Eigenschaften:

- Licht aus weißen LEDs:
  - weißes Licht aus Single-Chip-LEDs setzt sich aus blauem und gelbem Licht zusammen. Dadurch kann allerdings ein unnatürlicher Farbeindruck entstehen,
  - einige Hersteller beschichten die Single-Chip-LEDs zusätzlich mit weiteren Leuchtstoffen, um einen größeren Farbraum abzudecken.
- Licht aus drei LEDs (Primärfarben rot, grün und blau)
- OLEDs kommen als Flächenstrahler zum Einsatz. Die Monitorhersteller hatten längst geplant, ihre LED-Monitore durch OLEDs zu ersetzen. Jedoch sind die Herstellungskosten sehr hoch. Bei Display-Größen über 50 Zoll nimmt der Ausschuss bei der Fertigung immens zu.
  - Es gibt kaum Hersteller: *LG Electronics* ist bisher einziger Hersteller von großen OLED-TV-Displays, *Philips* will noch bis Ende 2017 ein Modell auf den Markt bringen (PHILIPS, Presse, 2016),
  - flexible und dünne Displays sind möglich,
  - kurzlebig (die Betriebsstundendauer liegt bei ca. 30.000 h).
- Licht aus blauen LEDs mit Quantenpunkttröhen oder Quantenpunktfolien als Farbkonverter (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 458-459).

## Bauformen

Es werden als Konstruktionsprinzipien bei LED-hintergrundbeleuchteten Geräten Edge Backlight, Direct-LED und LED-Backlight mit Quantenpunktkonverter eingesetzt.

### Edge Backlight

Die LEDs sind am Rand, oben, unten, oder seitlich an der Lichtleiterplatte eines Bildschirms befestigt (Abb. 1-20). Die Lichtleiterplatten können mit Mikrogravuren oder aufgedruckten Diffusionsmustern hergestellt werden und sollen das Licht der LEDs diffus und gleichmäßig auf der ganzen Anzeigefläche verteilen (Abb. 1-21, Abb. 1-22). Bei großflächigen Anzeigegeräten kann dies durch die Leuchtweite der LEDs zu Problemen führen (z. B. wird die Mitte eines Displays dunkler dargestellt als die Ränder). Durch die Konstruktion von Edge Backlight wird eine flache Gehäusetiefe von wenigen Millimetern erreicht (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 463).

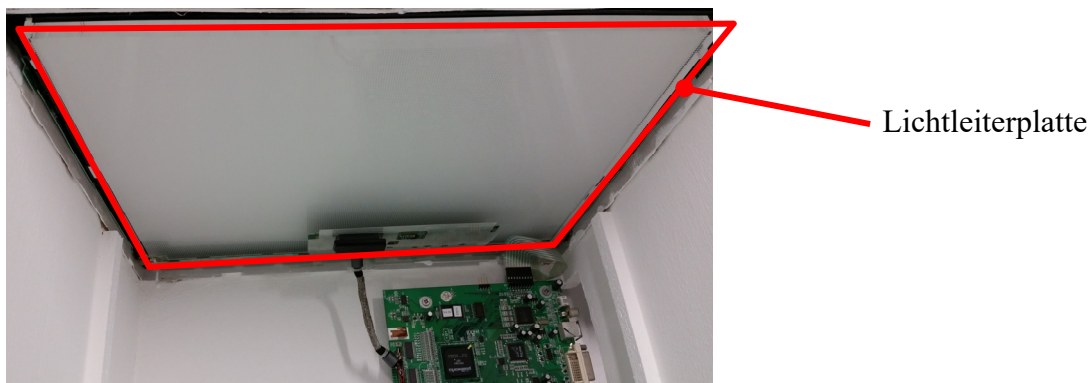


Abb. 1-20: Edge-Backlight

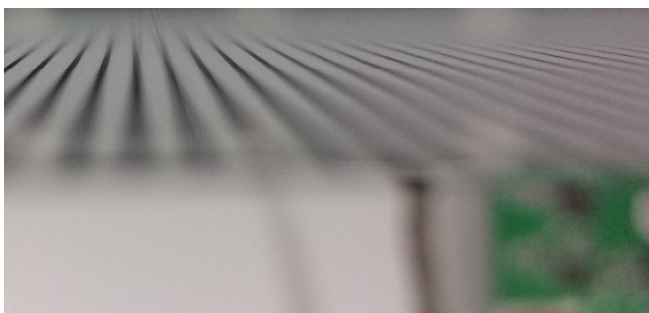


Abb. 1-21: Draufsicht Lichtleiterplatte

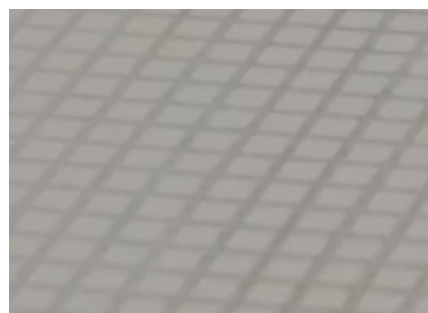


Abb. 1-22: Nahaufnahme des Diffusionsmusters

In der Backlight-Wanne befindet sich auf der Rückseite eine Reflektorschicht. Darüber befindet sich die Lichtleiterplatte, die für eine optimale homogene Flächenausleuchtung sorgt. Oberhalb der Lichtleiterplatte können einige Diffusorschichten angebracht sein, die



das reflektierte Licht diffus zum LCD weiterleiten. Das LCD schließt am oberen Rand die Konstruktion ab. Am Rand der Lichtleiterplatte, z. B. links und rechts, werden die LEDs platziert. Dieser Aufbau ist in der Abb. 1-23 als Querschnitt dargestellt:

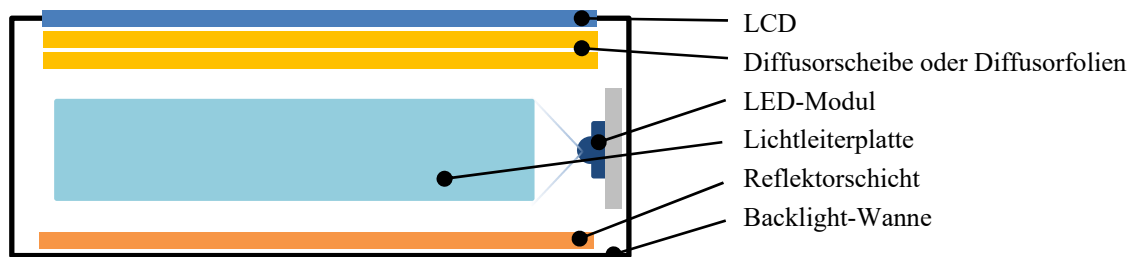


Abb. 1-23: Schnitt durch ein Edge-Backlight (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM)

### Direct-LED (Full-LED)

Eine große Anzahl von LEDs wird hinter dem LCD über die gesamte Bildfläche verteilt (Abb. 1-24). Ähnlich wie beim Edge-Backlight hilft die Diffusorscheibe mit Mikrolinsen oder Mikro-Lasergravur, das Licht gleichmäßig auf der Fläche des LCDs zu verteilen. Durch die *Local Dimming*-Funktion kann die Kontrastwirkung dieser Displays weiter optimiert werden. Dies geschieht durch die separate Ansteuerung jeder einzelnen LED. Somit kann jede LED in ihrer Helligkeit geregelt (gedimmt) oder abgeschaltet werden. Durch diese Möglichkeit ist die Flächenausleuchtung mit *Local Dimming* homogener. Es werden bessere Kontrast- und Schwarzwerte erreicht. Der Nachteil ist die größere Bautiefe (KOMPENDIUM, o. J.; Dehler, et al., 2015, S. 463).



Abb. 1-24: Direct-LED-Backlight Werbetafel, Ort: Hildesheim, Bushaltestelle Hansering

Die sogenannte Backlight-Wanne stabilisiert die gesamte Konstruktion. Auf dieser werden die LED-Module in der benötigten Anzahl montiert. Über den LED-Modulen werden optische Folien oder eine Diffusorscheibe installiert. Darüber kommt das LCD. Der Nachteil dieses Aufbaus liegt in der Mindestbauhöhe des Direct-LED-Backlights. Die LEDs haben einen bestimmten Abstrahlwinkel (Abb. 1-25).

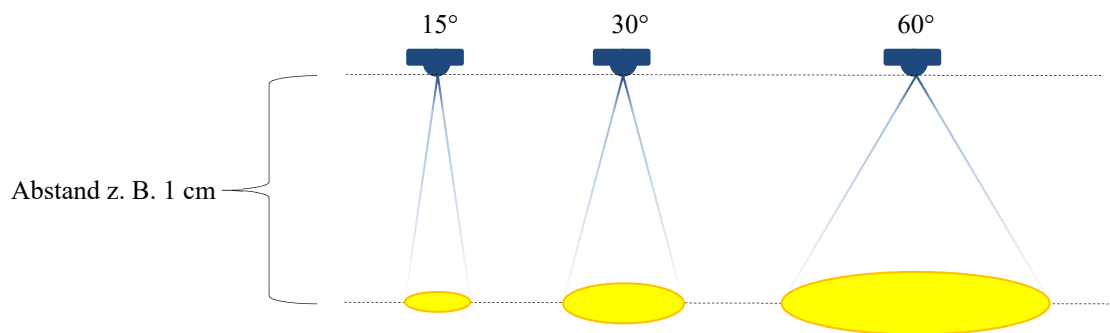


Abb. 1-25: Abstrahlwinkel verschiedener LEDs

Der Abstrahlwinkel bestimmt die Bauhöhe, da eine gleichmäßige Lichtverteilung auf der Diffusorscheibe garantiert werden soll (Abb. 1-26). Der Aufbau von Direct-LED-Backlight sieht im Querschnitt wie folgt aus:

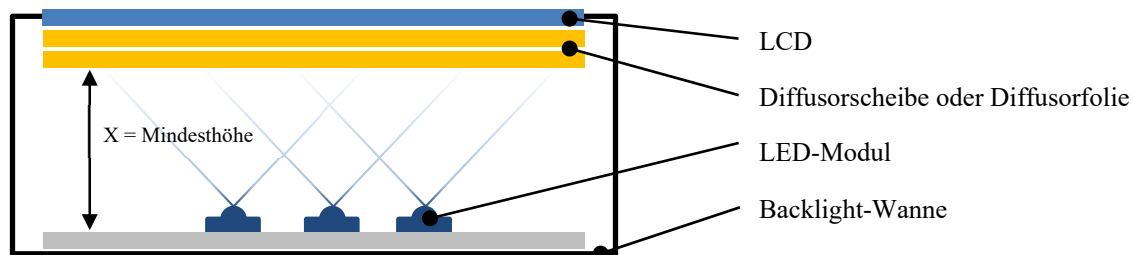


Abb. 1-26: Schnitt durch ein Full-LED-Backlight (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM)

### LED-Backlight mit Quantenpunktkonverter

LCDs, die mit Quantenpunkten (Quantum Dot) arbeiten, sind in der Regel ähnlich wie Edge- und Direct-LED-Backlight-Displays aufgebaut. Quantenpunkte sind Nanokristalle, in denen Quanteneffekte auftreten. Diese Quanteneffekte beeinflussen die Elektronen, um von einem Energieband zum anderen zu gelangen. Der Energiewechsel bestimmt die Farbe (des emittierenden Lichts) des Quantumdots (Bourzac, 2013). Für die Quantenpunktkonverter werden lediglich die Hintergrundbeleuchtungen geändert und angepasst. Dieser Vorgang lässt sich plausibel nachvollziehen. Das Licht aus blauen

LEDs bestrahlt rote und grüne Quantenpunkte. Diese werden durch die Bestrahlung angeregt und wandeln ein Teil des blauen Lichts in rotes bzw. grünes Licht um (ebd.). Durch die Farbmischung der RGB-Farben (Rot, Grün und Blau) entsteht ein Lichtspektrum von weißem Licht, welches einen größeren Farbraum abdeckt als eine LED-Hintergrundbeleuchtung ohne Quantenpunktconverter.

Die folgenden beiden Ansätze werden zurzeit verfolgt:

- Bei Edge Backlight kommen blaue LEDs zu Einsatz, die ein Glasrohr, in denen sich Quantenpunkte in einer transparenten Matrix befinden, bestrahlen (Abb. 1-27). Das LED-Modul strahlt blaues Licht ab. Dieses trifft auf das Glasröhrchen mit Quantenpunkten. Ein Teil des blauen Lichts passiert das Glasrohr ungehindert. Der andere Teil trifft im Glasrohr auf grüne und rote Quantenpunkte. Die Quantenpunkte emittieren grünes und rotes Licht, sodass RGB-Licht durch die Lichtleiterplatte geleitet wird. Dieses wird von der Reflektorschicht zurückgeworfen und trifft anschließend auf das LCD (Abb. 1-28).

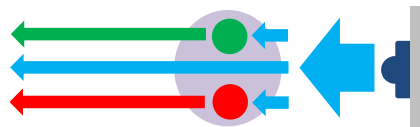


Abb. 1-27: Glasrohr mit Quantenpunkten

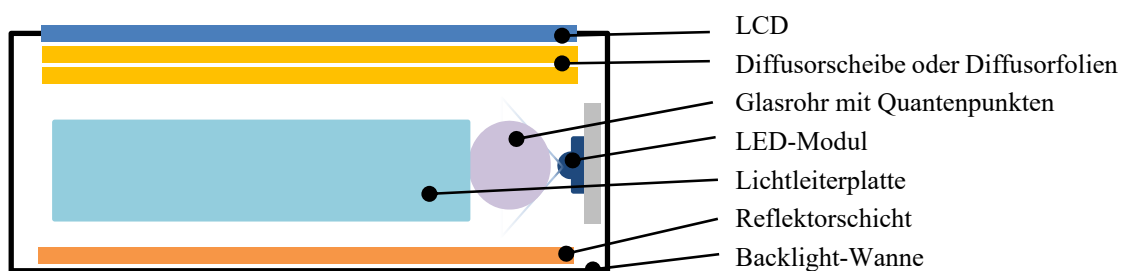


Abb. 1-28: Schnitt durch ein Edge-Backlight mit Quantenpunktrohr (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM)

- Bei Direct-LED-Backlights (Abb. 1-29) kann in den „Stapel“ der Diffusor- und optischen Folien eine Quantenpunktfolie eingefügt werden. Sie kann auch als Ersatz für eine Diffusorfolie eingesetzt werden, da diese eine ähnliche lichtstreuende Eigenschaft hat (KOMPENDIUM, o. J.).

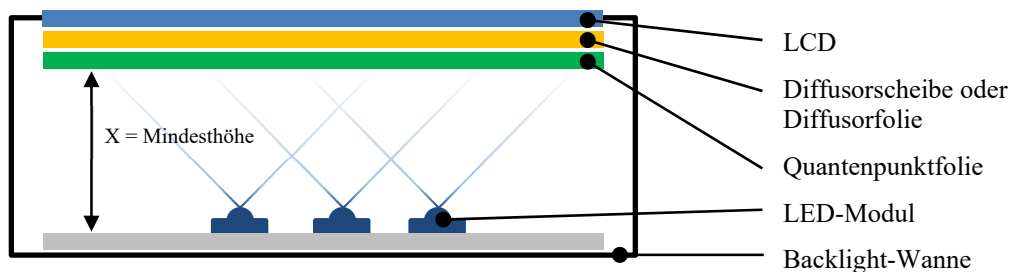


Abb. 1-29: Funktionsweise eines Backlights mit Quantenpunktfolie (Bildquelle: verändert nach KOMPENDIUM)

Des Weiteren gibt es einige Patente, die im Hinblick auf tageslichtähnliche Simulation das Beleuchtungsspektrum für bestimmte Aufgaben verbessern wollen:

- Patentnr. WO2012011008 A1, 2012:  
Ein Beleuchtungssystem mit einem tagesähnlichen Verlauf für z. B. Räume/Hallen, soll eine bessere Arbeitsumgebung schaffen und die Arbeitsleistung erhöhen.
- Patentnr. WO2016096387 A1, 2016:  
Beleuchtung durch eine Weißlichtarbeitsquelle, die zur Erhöhung der Lesbarkeit im Blaulichtspektrum geändert werden kann.
- Patentnr. WO2007114614 A1, 2007:  
Leuchtstoffänderungen in den Leuchten zur Erzeugung eines Farbspektrums.
- Patentnr. WO2012095765 A2, 2012:  
Tageslichtverlaufs-Beleuchtungs-System für z. B. Räume ohne Fenster, hauptsächlich Intensivstationen, Position der Lichtquelle kann durch viele einzelne Lichtquellen eingestellt werden.
- Patentnr. US20140306620 A1, 2014:  
Verwendung einer Leuchte mit zwei Blaulichtspektralanteilen, die variiert werden können. Ein Sensor überwacht den konstanten Lichtstrom und die Farbqualität. Der Benutzer kann bei dieser Leuchte die Blaulichtanteile zu- oder abschalten.

- Patentnr. EP1462711 A1, 2004:  
Bei diesem Beleuchtungssystem wird die Farbtemperatur mit Hilfe eines Farbtemperatur-Umwandlungsfilters angepasst.
- Patentnr. WO2014123781A1, 2014:  
Diese Beleuchtungsanordnung besteht aus einer LED, die vier einzelne Chips beinhaltet, wobei jeder Chip zur Änderung des abgestrahlten Lichtspektrums zu- und abgeschaltet / gesteuert werden kann.

Lösungsversuche zur Verringerung des Blaulichtanteils im Farbspektrum liegen auch als Software-Lösungen vor. Dabei wird auf einem Rechnersystem eine Software installiert, die die Farbtemperatur des Bildschirmes entsprechend dem Tageslichtverlauf der Sonne steuert. Folgende Software kann die eingestellten und geforderten Farbtemperaturen von grafischen Ausgabegeräten an den Tageslichtverlauf der Sonne anpassen:

- z. B. für Linux: *Redshift* (ubuntuusers, 2016),
- z. B. für Microsoft Windows: *f.lux* (flux, 2016),
- z. B. für ein Android-Smartphone: *Twilight* (Urbandroid Team, 2016) oder Blaulichtfilter-Augenpflege (Hardy-infinity, 2016)

Unter *Microsoft Windows 10* ist es ab der Entwickler-Version 14997 möglich, einen Blaulichtfilter (Software) zu aktivieren und bei Apple's iOS 9.3 gibt es einen Night-Shift-Modus.

In der Anwendung von *f.lux* (Abb. 1-30) ergibt sich z. B. für ein LED-Laptop-Display vom Model Lenovo T530 folgendes Lichtspektrum:

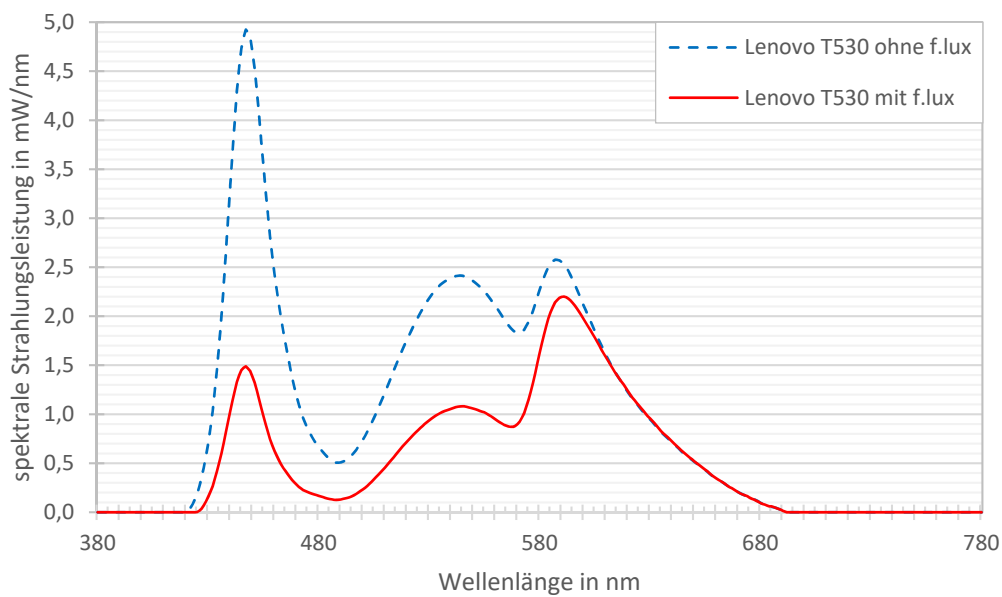


Abb. 1-30: Spektrum Lenovo T530 ohne und mit *f.lux* aktiviert

Es zeigt sich im Lichtspektrum eine deutliche Senkung der Strahlungsleistung im blauen und grünen Bereich, der Bereich der roten Spektrallinien wird kaum berührt.

Bei einem AMOLED-Display (*Active Matrix Organic Light Emitting Diode*, Abb. 1-31) vom Model *Samsung Galaxy S5* wird durch die Softwarelösung *Twilight* z. B. der Blau- und Grünanteil reduziert.

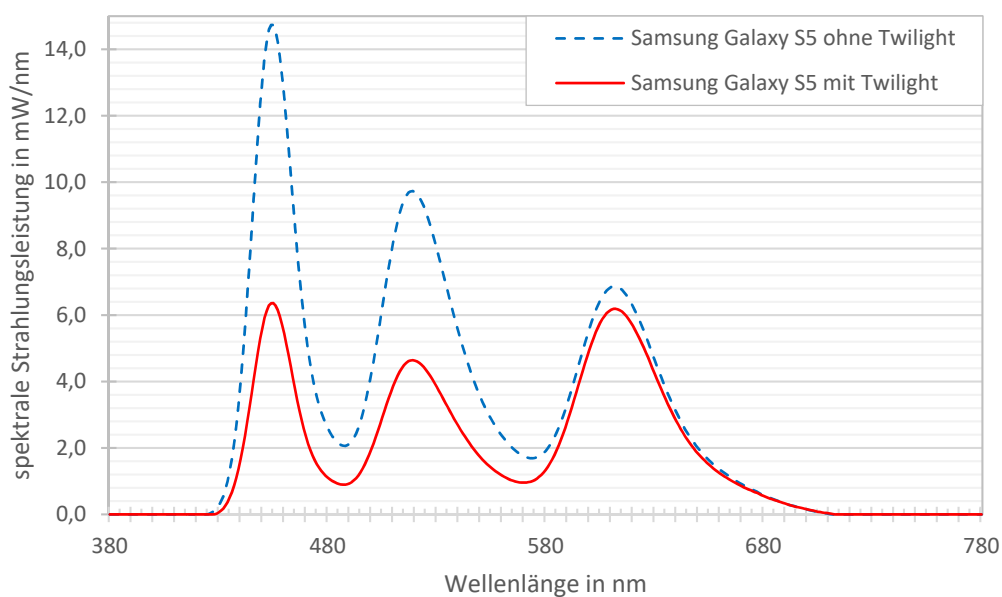


Abb. 1-31: Spektrum *Samsung Galaxy S5* ohne und mit *Twilight* aktiviert

Inzwischen haben einige Hersteller von Monitoren erste Konzepte für das „Blaulicht“-Problem (Abb. 1-32) entwickelt:

*EIZO* hat z. B. die „Auto-EcoView“-Funktion in einigen Monitoren (z. B. EV2455 FlexScan) eingebaut. Das Prinzip dieser Funktion ist ein Umgebungslichtsensor, der die Helligkeit des Monitors der Umgebung anpasst. Dadurch sollen die Augen des Benutzers entlastet und die Betrachtung angenehmer werden (EIZO, 2016).

*ViewSonic* verwendet einen sogenannten „Blue Light Filter“ in einigen Monitoren (z. B. XG2703-GS). Diese Technik „dimmt“ die Hintergrundbeleuchtung und passt die Farbverschiebung im Rahmen der Aussteuermöglichkeiten mit Hilfe des LCDs an (ViewSonic, 2016).

*Asus* hat die „Eye Care“-Funktion in einigen Monitoren (z. B. PG248Q) eingebaut (Asus, 2016). Bei diesen Softwaresystemen wird die Beleuchtung durch die Helligkeit und die Monitorfarbe auf Basis einer Datenbank und/oder eines Umgebungslichtsensors gesteuert.

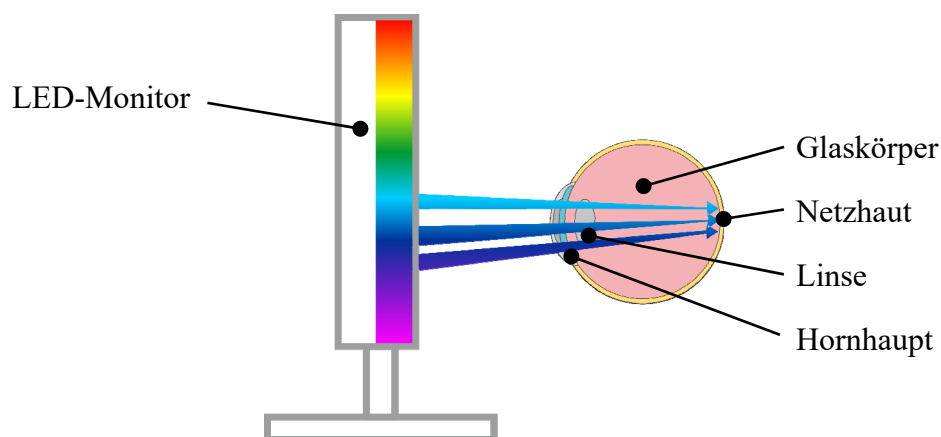


Abb. 1-32: Blaulichtanteil bei LED-Monitoren soll reduziert werden

Eine andere Lösung, den Blaulichtanteil hardwareseitig zu eliminieren, ist ein geeigneter Filter, beispielsweise eine Brille „DuraVision® BlueProtect“ von *Carl Zeiss* (ZEISS, 2016) oder eine *PRiSMA* Blaulichtschutzbrille von *Innovative Eyewear* (Innovative Eyewear, 2016).

Die „DuraVision® BlueProtect“ Brille (Abb. 1-33) reduziert nur einen kleinen Teil des Blaulichts.

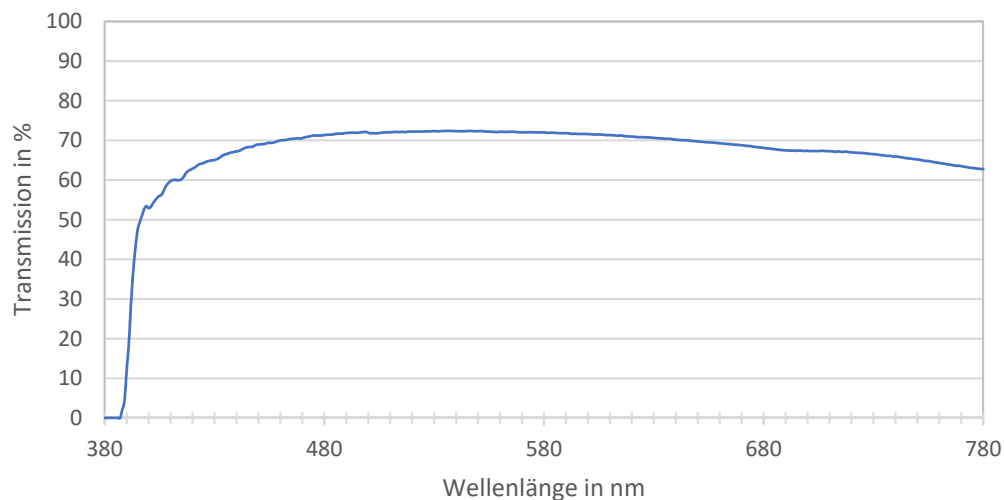


Abb. 1-33: „DuraVision® BlueProtect“ Filter Glas gemessen für eine Halogenleuchte

Der „bluelightprotect Filter“, ein Produkt der Firma *Innovative Eyewear* (Abb. 1-34), filtert den Blaulichtanteil komplett heraus.

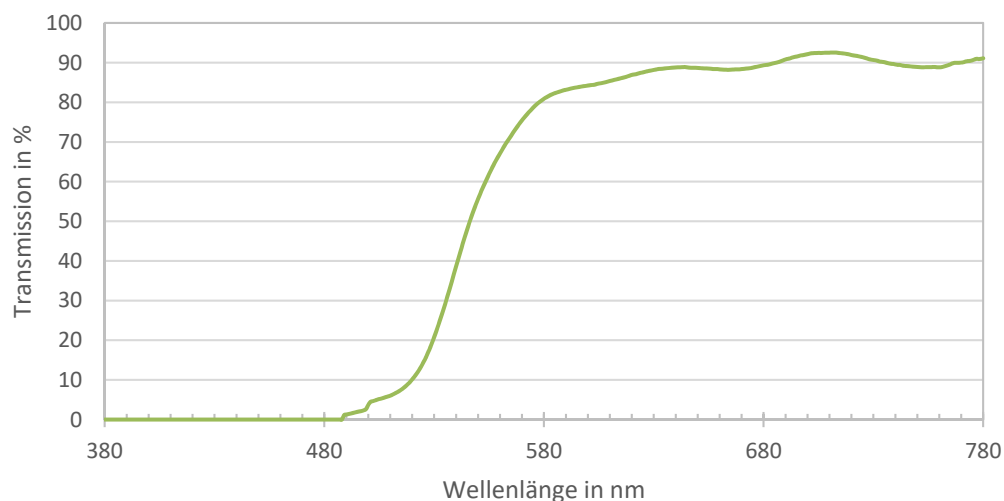


Abb. 1-34: „bluelightprotect Filter“ gemessen für eine Halogenleuchte

In der Bildschirmarbeitsverordnung (BildscharbV) oder der DGUV-Information 215-410 (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) sind die Anforderungen an die verwendeten Anzeigegeräte nach dem Stand der Technik dargestellt, jedoch werden hier keine Festlegungen hinsichtlich der Lichtzusammensetzung in den Beleuchtungsquellen der Anzeigegeräte getroffen.

Die BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) weist auf den Blaulichtanteil in der Beleuchtung in ihrem Leitfaden „Photobiologische Sicherheit von Licht



emittierenden Dioden (LED)“, Projekt F 2115 (Udovičić, Mainusch, Janßen, Nowack, & Ott, 2013) hin und überprüfte alle im Projekt F 2215 getesteten LEDs auf die Emissionsgrenzwerte der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 (Deutsches Institut für Normung). In ihrer Studie „Circadiane Wirksamkeit Aml-basierter Beleuchtungssysteme: Wirkungsfragen circadianer Desynchronisation“, Projekt F 2302 (Kunz, 2015) werden die Effekte von blau-angereicherten Beleuchtungssystemen in den Morgen- und Abendstunden und deren Auswirkungen auf die biologische Uhr des Menschen untersucht.

Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) kritisiert die hohen Blaulichtanteile im LED-Licht (ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik, 2014).

Des Weiteren gibt es Normen für die Beleuchtungstechnik:

- Beleuchtung im Büro (VBG, 2008),
- Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten, DIN EN 12464 Teil 1 und Teil 2; DIN 5035 Teil 7,
- Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4 Beleuchtung (BAuA, 2011),
- Biologische, nichtvisuelle Wirkung des Lichts; Stand der Wissenschaft und Forschung FNL 27; DIN SPEC 67600; DIN V 5031-100.

## 1.4 Problematik bei aktuellen Leuchten-Systemen

In zunehmenden Maße verbringen die Menschen täglich viele Stunden vor bildgebenden Geräten (Smartphone, Fernseher, Tablet, etc.). Damit ist die Beleuchtungstechnik für beleuchtete Oberflächen in der heutigen Zeit allgegenwärtig. Aufgrund der zunehmenden Anzahl von Geräten und Anwendungen nehmen aber auch die negativen Auswirkungen an Bedeutung immer mehr zu.

Die in Kapitel 1.3 beschriebenen Leuchtsysteme können die Blaulichtanteile der Lichtspektren nicht separat steuern. Lichtspektren können auf unterschiedliche Art und Weise zusammengesetzt sein. Weiße LEDs bestehen z. B. aus blauen LEDs, die mit einer gelben Phosphorschicht überzogen sind (Hering, Martin, & Stohrer, 2016, S. 281). Dadurch wird blaues mit gelbem Licht additiv gemischt und erscheint für das menschliche Auge weiß (Tab. 1-1).

	LED-based	LED-plus-phosphor-based	
<b>Dichromatic white source</b>	Blue and yellow LED	Blue LED plus yellow phosphor	Dichromatic-LED
<b>Trichromatic white source</b>	Blue, green and red LED	Blue and red LED plus green phosphor	UV LED plus tri-Phosphor
<b>Tetrachromatic white source</b>	Blue, cyan, green and red LED	Blue, cyan, and red LED plus green phosphor	Blue and red LED plus cyan and green phosphor

Tab. 1-1: Verschiedene Möglichkeiten der Weißlicht-Erzeugung mit LEDs, (Quelle verändert nach Schubert, 2006, S. 346)

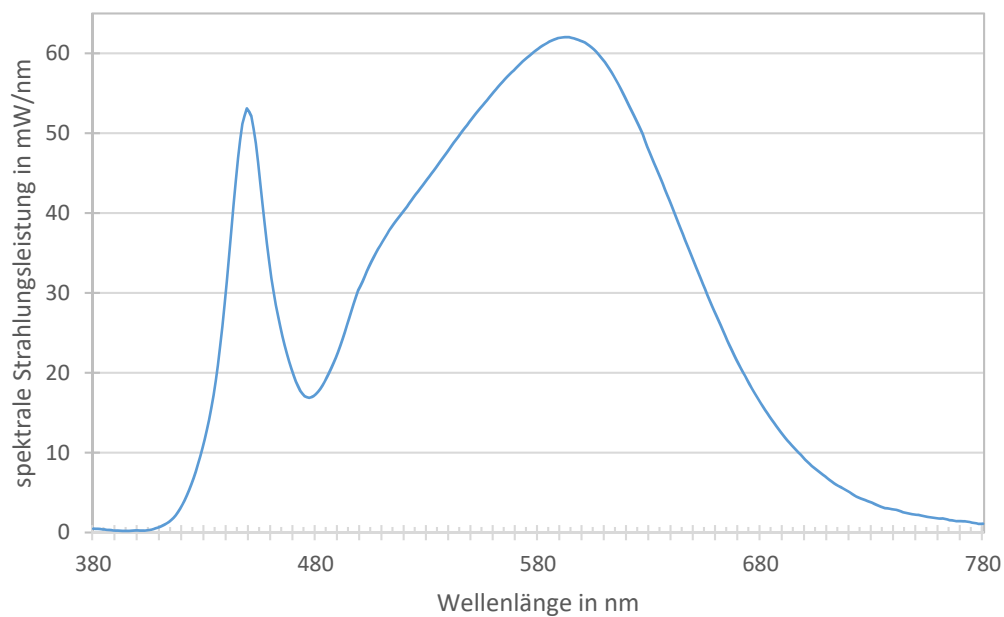


Abb. 1-35: spektrale Lichtverteilung einer *OSRAM* LED STAR Classic A 40

Ein großer Blaulichtanteil bleibt jedoch im Lichtspektrum erhalten (Abb. 1-35).

Für die Einstellmöglichkeiten der Hintergrundbeleuchtung gibt es eine ganze Reihe von Ansätzen. Die Hintergrundbeleuchtung kann ein- und ausgeschaltet werden. Teilweise kann durch *Local Dimming* ein besserer Schwarzwert erreicht werden. Es besteht ebenso die Möglichkeit, die Helligkeit und die Farbe durch das LCD zu steuern. Der individuelle Biorhythmus und die Farbwiedergabewerte finden bisher keine hardwareseitige Berücksichtigung, da oft nur warm- oder kaltweiße LEDs eingesetzt werden. Dadurch ist es prinzipiell möglich, eine Vorgabe eines beliebig vorgegebenen tagesverlauf-ähnlichen Beleuchtungszustands zu schaffen. Die Problematik des hohen Blaulichtanteils im Lichtspektrum der weißen LEDs ist jedoch weiter vorhanden.

Bislang sind keine LED-Leuchten mit steuerbarem Farbspektrum für beleuchtende, bildgebende oder beleuchtete Flächen, z. B. Aktiv- bzw. Passiv-Matrix-Anzeigen (Monitor, Tablet, Smartphone etc.), Werbewänden etc. verfügbar.

Die folgende Tabelle (Tab. 1-2) veranschaulicht die Eigenschaften verschiedener Lichtquellen und zeigt deutlich, dass der Blaulichtanteil in einigen Lichtquellen sehr hoch ist.

Lichtquelle	Gehalt an blauem Licht	Gehalt an Rot und NIR* <sup>1</sup>	Relative Helligkeit* <sup>2</sup>	Retinale Toxizität
<b>Sonne</b>	hoch	hoch	hoch	neutral* <sup>3</sup>
<b>Glühlampe</b>	niedrig	hoch	niedrig	niedrig
<b>Energiesparlampe</b>	hoch	niedrig	niedrig	hoch
<b>Weißer LED</b>	hoch	niedrig	niedrig	hoch
<b>TFT-Monitor</b>	hoch	niedrig	niedrig	hoch

\*<sup>1</sup> NIR = nahes Infrarot, \*<sup>2</sup> relativ zum Sonnenlicht, \*<sup>3</sup> gilt für Streulicht, nicht bei direktem Einblicken

Tab. 1-2: Blaulichtanteile im Licht, (Quelle verändert nach: Wunsch 2007)

Licht mit einem hohen Blaulichtanteil hat eine ganze Reihe von Auswirkungen auf den menschlichen Organismus. Der Blaulichtanteil des Lichts steigert die Leistungsfähigkeit des Menschen. In den Abendstunden sollten jedoch für einen gesunden Schlafrhythmus Lichtquellen mit einem hohen Blaulichtanteil vermieden werden. Der Blaulichtanteil im Lichtspektrum kann die Hemmung der Melatonin-Ausschüttung im menschlichen Körper verursachen, was zu Unwohlsein, Schlafstörung oder ähnlichen Krankheitszeichen führen kann (Wood, Rea, Plitnick, & Figueiro, 2012). Am Abend nutzen viele Menschen zur Entspannung z. B. einen LED-Fernseher, ein Tablet, ein Smartphone oder andere technische Medien. Der hohe Blaulichtanteil dieser Geräte kann genau das Gegenteil bewirken. Die „normale“ Melatonin-Ausschüttung wird dadurch teilweise oder gänzlich unterdrückt und der circadiane Rhythmus gestört (Chang, Aeschbach, Duffy, & Czeisler, 2015). Des Weiteren nimmt die Müdigkeit am Tag nach dem abendlichen Konsum von Multimediageräten, wie z. B. Smartphones, zu (Van den Bulck, 2007).

Die in Kapitel 1.3 beschriebenen Softwarelösungen steuern das LCD entsprechend der gewünschten Farbtemperatur. Die Monitorfunktionen der Hersteller für PC-Monitore sind nach demselben Prinzip aufgebaut.

Filterlösungen filtern einen Teil des Lichts aus dem sichtbaren Farbspektrum heraus. Beispielsweise absorbieren Spezial-Brillen einen Teil des Lichtspektrums. Jedoch sind die „Brillen-Filter“ statisch. Es kann nicht dynamisch nachgesteuert werden. Es gibt lediglich zwei Zustände: mit oder ohne Filter. Die beiden in Kapitel 1.3 genannten Lichtschutz-Brillen reduzieren die Transmission des blauen Lichtspektrums in einem bestimmten spektralen Bereich. Der Melatoniningehalt im Körper wird beim Tragen dieser Bildschirmbrillen erhöht (Van der Lely, et al., 2014). Dabei entsteht eine andere Farbwahrnehmung für das menschliche Auge. Das kann sehr gewöhnungsbedürftig sein, da der spektrale Bereich des blauen Lichts fehlt und somit einige Farben „falsch“

dargestellt werden. Eine länger anhaltende Bestrahlung der Netzhaut der Augen mit blauem Licht von unterhalb von 460 nm kann zu einem erhöhten Risiko von Netzhauterkrankungen führen. Langfristig können diese Schädigungen die Risiken für z. B. eine Makuladegeneration erhöhen (Engelmann & Funk, 2009).

## 1.5 Farbwahrnehmung des menschlichen Auges

Das Sehvermögen des menschlichen Auges wird durch die Sinneszellen, die sogenannten Stäbchen und Zapfen, gesteuert. Die Zapfen sind für die Wahrnehmung von Farben (blau, grün und rot) verantwortlich, die Stäbchen für das Sehen in der Dunkelheit. Die S-Zapfen (blau) haben ihr Empfindlichkeitsmaximum bei 420 nm, die M-Zapfen bei 534 nm und die L-Zapfen bei 564 nm (Priese, 2015). Die Verteilung der spektralen Empfindlichkeit der menschlichen Farbsensoren sind in Abb. 1-36 dargestellt.

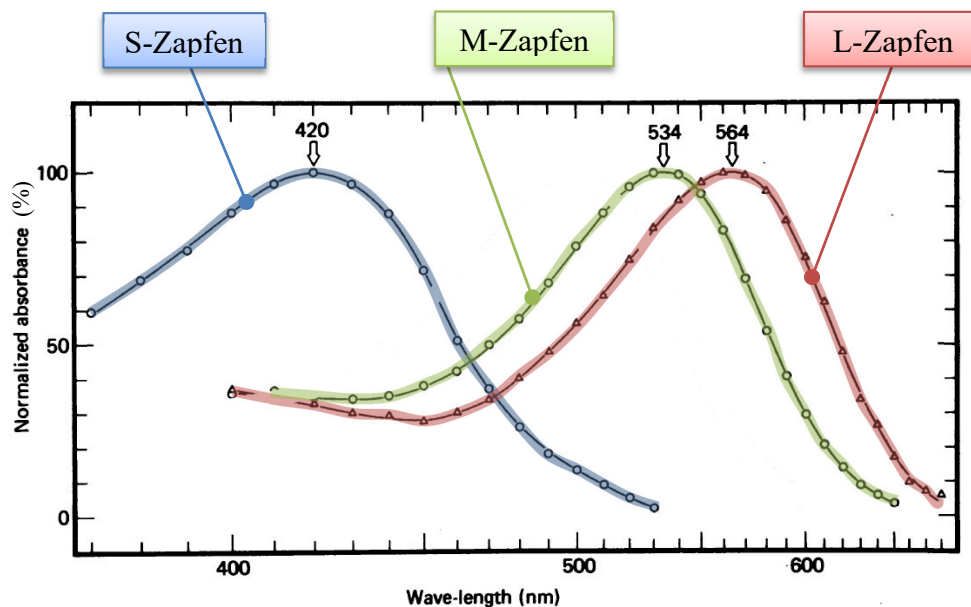


Abb. 1-36: Spektrale Empfindlichkeit der Zapfen des menschlichen Auges  
(Bildquelle: verändert nach Bowmaker & Dartnall, 1980)

Das Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges ist von der Tageszeit abhängig. Daher erscheint es sinnvoll, das Lichtspektrum der Leuchte an das Helligkeitsempfinden anzupassen und darauf zu achten, dass der Biorhythmus nicht gestört wird. Die V-Lambda-Kurve beschreibt den relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges bei Tag und Nacht (Abb. 1-37).

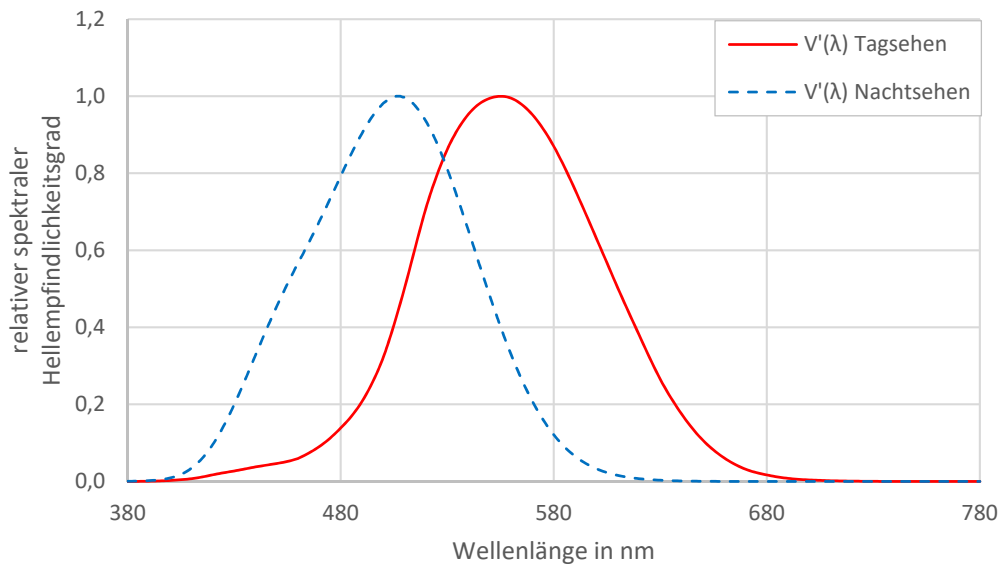


Abb. 1-37: Kurven der relativen Hellempfindlichkeit des Menschen: Tagsehen  $V(\lambda)$  (rot) im Vergleich zum Nachtsehen  $V'(\lambda)$  (blau), (CIE Standard Colorimetric Observer Data, 1931)

Farben können durch Licht-Reflexion oder durch Licht-Transmission erkannt werden. Bei der Reflexion wird das Licht von undurchlässigen Materialien reflektiert und bei der Transmission durchdringt das Licht teilweise die lichtdurchlässigen Materialien. Die Farbe ergibt sich aus dem im sichtbaren Teil des Lichtspektrums absorbierten Wellenbereich. Dadurch erscheinen alle Objekte farbig. Die Farbe, die das menschliche Auge wahrnimmt, entspricht der jeweiligen Komplementärfarbe des absorbierten Farbspektrums (Tab. 1-3).

absorbiertes Licht Wellenlängenbereich in nm	zugehörige Farbe		gestreutes und reflektiertes Licht wahrgenommene Farbe	
380 - 430		violett		gelbgrün
430 - 480		blau		gelbgrün
480 - 490		grünblau		orange
490 - 500		blaugrün		rot
500 - 560		grün		purpur
560 - 580		gelbgrün		violett
580 - 595		gelb		blau
595 - 605		orange		grünblau
605 - 750		rot		blaugrün
750 - 770		purpur		grün

Tab. 1-3: Absorbierte Farben und ihre Komplementärfarben, (Quelle verändert nach: Breitmaier & Jung, 2005, S. 709)

Die Farbwahrnehmung ergibt sich durch die additive Farbmischung (Abb. 1-38). Werden alle drei Grundfarben (blau, grün und rot) gleichmäßig gemischt, ergibt sich weiß (Dehler, et al., 2015, S. 456).

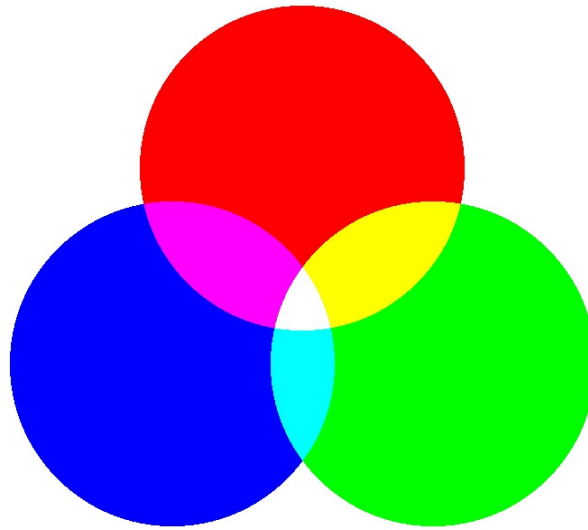


Abb. 1-38: Additive Farbmischung

## 2 Anforderungen an das zu realisierende System

Die Festlegung der Anforderungen an das Leuchten-System ist eine grundlegende Voraussetzung für die herzustellende Funktionalität. Das System soll einfach konfigurierbar, möglichst weit verfügbar und kostengünstig herzustellen sein. Zu den Basisfunktionen sollen Zusatzfunktionen für beliebige Einstellungsmöglichkeiten realisiert werden.

Die Basis für das Steuerungssystem der Leuchte bilden der Tageslichtverlauf, die Lichttemperatur, die Helligkeit und ggf. weitere Einflussfaktoren. Die für den Tageslichtverlauf hinterlegten Verlaufswerte der Lichteigenschaften sollen individuell angepasst werden können.

In der praktischen Anwendung wird die LED-Leuchte seitlich oder hinter der zu beleuchtenden Oberfläche, z. B. der Bildschirmoberfläche eines Monitors, angebracht. Eine spezielle Leuchtplatte wird zur homogenen Ausleuchtung benötigt. Ein PC oder ein Micro-Controller übernimmt die Systemregelung. Die Ansteuerung der LED-Leuchte erfolgt durch einen PC-gesteuerten PWM-Controller (Pulsweitenmodulation). Die Pulsweitenmodulation, die im späteren Verlauf näher betrachtet wird, ermöglicht die Steuerung der Lichtstärke, der Farbtemperatur, des Lichtspektrums und des Farbwiedergabeindex. Der Anwender kann die technischen Eigenschaften der LED-Leuchte und die gegenseitigen Abhängigkeiten der Parameter individuell einstellen und damit das Ergebnis nach seinen Anforderungen beeinflussen.

Allgemein hängt auch die Steigerung des Wohlbefindens und der Konzentrationsfähigkeit des Menschen vom Beleuchtungsumfeld ab. Durch die beliebig einstellbaren Parameter der Leuchte hat der Nutzer die Möglichkeit, den dafür verantwortlichen Blaulichtanteil des Lichts zu verringern oder abzuschalten, um seinen Melatonin-Haushalt nicht zu stören. Infolgedessen benötigt der Betrachter von beleuchtenden, bildgebenden oder beleuchteten Flächen keine zusätzlichen Hilfsmittel (z. B. *DuraVision® BlueProtect*-Gläser von *Zeiss* oder eine *PRiSMA*-Lichtschutzbrille von *Innovative Eyewear*), um sich dem hohen Blaulichtanteil aus weißfarbigen LEDs nicht auszusetzen.

Insgesamt ergeben sich aus einer individuellen Bedienmöglichkeit eines Leuchten-Systems weitere Vorteile für den Nutzer:

- Bessere Lichtverhältnisse auf der beleuchteten Oberfläche,
- Einstellbarkeit eines beliebig vorgegebenen tagesverlaufähnlichen Beleuchtungszustandes,
- individuelle Anpassung der Beleuchtung an den Biorhythmus des Menschen,
- Energieeinsparung,
- Verbesserung des Wohlbefindens und Erhaltung der Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz.

Anwendungsbeispiele sind heute durch die Entwicklung unserer medialen Welt allgegenwärtig: beleuchtete Großflächen in der Außenwerbung, Monitore, Fernsehgeräte, Smartphones, Tablets, Lichtwände usw.

Die Rahmenbedingungen für ein Leuchten-System zur Bedienung von beleuchteten, bildgebenden oder beleuchtenden Flächen stellen sich wie folgt dar:

- Automatische Regelung der LED-Leuchte(n) unter Nutzung von Sensorsignalen (Erfassung von Lichtstärke, Farbtemperatur, Farbwiedergabeindex etc.),
- Installation der LED-Leuchten hinter, vor oder getrennt von den beleuchtenden, bildgebenden oder beleuchteten Flächen,
- die Basis für die Regelung der LED-Leuchte(n) mit steuerbarem Farbspektrum kann durch den Tageslichtverlauf (Farbtemperatur, Helligkeit) oder die vom Benutzer einstellbare Tageslichtverlaufskurve erfolgen,
- Realisierung der Kommunikation zwischen dem Sensor zum Erfassen der Messgrößen und der Steuerungseinheit der Leuchtenregelung über eine Verkabelung oder über eine drahtlose Schnittstelle,
- individuelle Steuerung der Beleuchtung über eine Software durch einen beliebig vorgegebenen tagesverlaufähnlichen Beleuchtungszustand, angepasst an eine vorgegebene Funktion, z. B. einen Biorhythmus,
- Realisierung der Energieeinsparung durch eine geeignete Auswahl der Beleuchtungsflächen und durch passende Hard- und Softwarekomponenten,
- Steigerung des Wohlbefindens und der Konzentrationsfähigkeit des Menschen durch den beliebig einstellbaren tagesverlaufähnlichen Beleuchtungszustand.



## 2.1 Basisfunktionen

Die LED-Leuchten mit steuerbarem Farbspektrum müssen über eine besondere Regelung für die Zusammensetzung des Lichtspektrums verfügen, um die geforderten Eigenschaften, wie z. B. die Minimierung des Blaulichtanteils, zu gewährleisten.

Folgende Randbedingungen müssen für die Nachbildung eines Farbspektrums definiert werden:

- Festlegung z. B. auf eine bestimmte Farbtemperatur,
- Festlegung auf einen Wellenlängenbereich des Spektrums,
- Definition der Helligkeit (Normen müssen eingehalten werden),
- Minimierung oder besser Vermeidung von UV- und Infrarotstrahlung.

Das steuerbare Farbspektrum des Testaufbaus weist nur einen Teil des Sonnenlichts auf. Das Lichtspektrum der LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum soll das Lichtspektrum einer Hintergrundbeleuchtung möglichst genau nachempfinden. Der Vorteil von z. B. Halogenleuchten ist unter anderem ein sehr hoher CRI, wodurch eine sehr hohe Farbtreue erreicht wird. Der Blaulichtanteil einer Halogenleuchte (Abb. 2-1) ist zudem äußerst gering. Zur Erhöhung der Farbwiedergabe ist es sinnvoll, mehr als nur eine LED (z. B. warmweiß) zu verwenden. Im Bereich des Blaulichts (ca. 430 – 500 nm) ist durch mehrere LEDs eine gezielte Abschaltung bzw. Steuerung dieser Farbtemperaturen möglich.

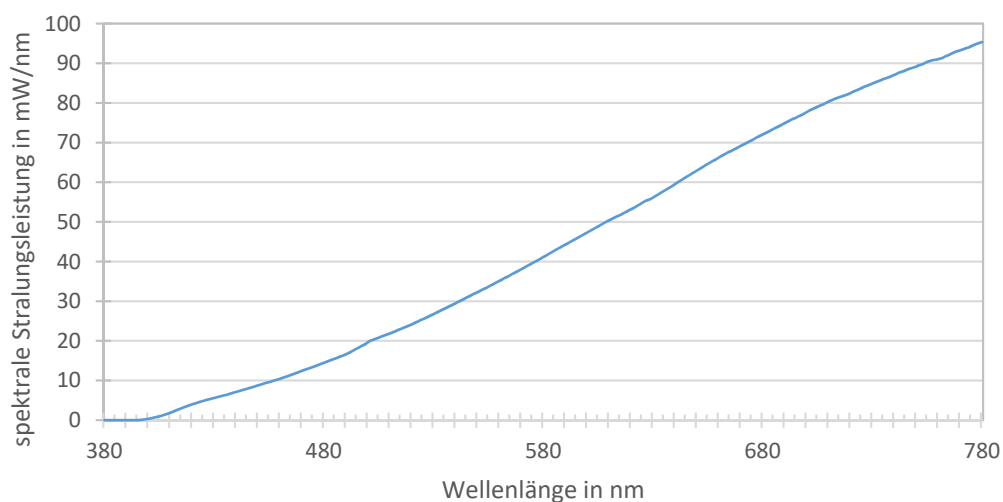


Abb. 2-1: charakteristisches Spektrum einer Halogenleuchte 40 W / 12 V OSRAM

Es gibt verschiedene Lichtqualitätsindizes für die Definition der Farbwiedergabe von Leuchtmitteln, Leuchten, Displays, für Digitalfotographie und z. B. Fernseher. An dieser Stelle seien einige erwähnt.

Der bekannteste und verbreitetste Farbwiedergabeindex ist der CRI. Der CRI kennt nur acht Referenzfarben  $R_a$ . Die Anzahl der Referenzfarben wurde durch die große Menge neuer Leuchtmittel wie LED und Leuchtstoffröhren auf 14 bzw. 15 Referenzfarben erweitert (Abb. 2-2). Der erweiterte Farbwiedergabeindex ist unter der Abkürzung  $R_e$  bekannt. Diese Anzahl von Referenzfarben stellt lediglich eine kleine Auswahl aller möglichen Farbwerte dar, die eine ideale Lichtquelle abbilden kann.

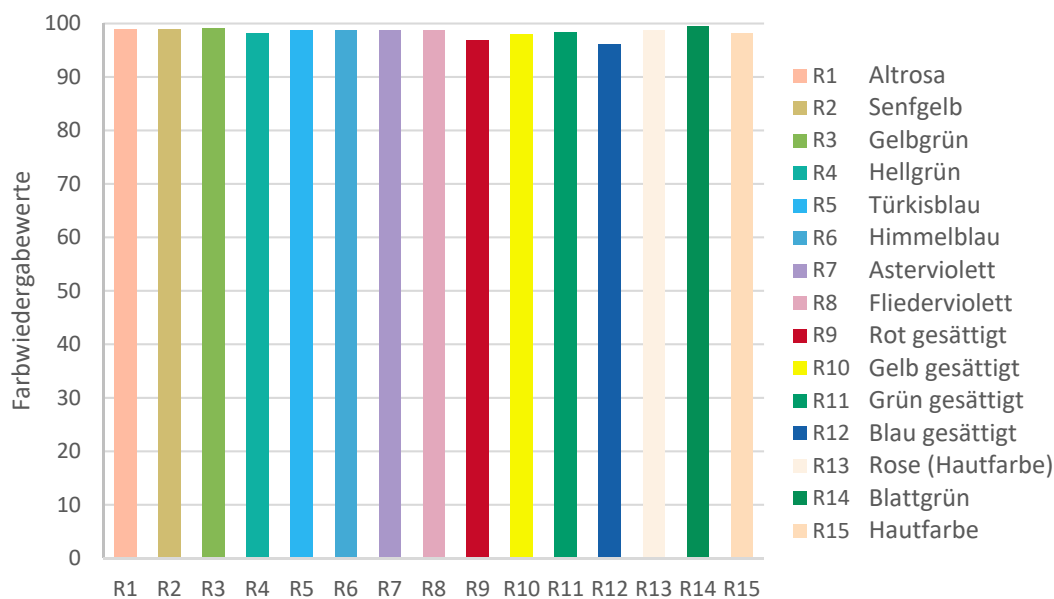


Abb. 2-2: Farbwiedergabeindizes einer Halogenleuchte 40 W / 12 V OSRAM,  
Testfarben definiert nach DIN 6169

Aus diesem Grunde wurde in der Filmindustrie ein neuer Standard „Television Lighting Consistency Index“ (TLCI) 2012 von der EBU (*European Broadcasting Union*) definiert. Dieser Index basiert auf 24 Referenzfarben (European Broadcasting Union, 2012).

Das NIST (*National Institute of Standards and Technology*) hat ebenfalls eine Farbqualitätsskala (englisch *Color Quality Scale* (CQS)) herausgebracht, die eine Aussage über gesättigte Farben ermöglicht (Ohno & Davis, 2010).

2015 veröffentlichte die nordamerikanische IES (*Illuminating Engineering Society*) ebenfalls einen neuen Standard zur Bestimmung der Farbwiedergabe (Aurelien, et al., 2015). Die Palette der Referenzfarben umfasst 99 Farben. Der  $R_f$  (Fidelity-Index) beschränkt sich dabei auf einen Wertebereich von 0-100.

Für die Nachbildung eines steuerbaren Farbspektrums für eine Hintergrundbeleuchtung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Farbtemperatur ca. 2000 K – 6000 K,
- Farbwiedergabeindex  $R_a \geq 80$ ,
- Wellenlängenbereich 380 – 780 nm, sichtbarer Bereich (englisch *visible*, VIS),
- Standard LCD Leuchtdichte  $\geq 150 \text{ cd/m}^2$  (TCO DEVELOPMENT, 2015, S. 12),
- keine Emission von UV- und Infrarotstrahlung.

### 3 Systemdesign

Für das Systemkonzept werden in Abschnitt 3.1 die positiven Aspekte einer LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum und deren Vorteile aufgezeigt. In Abschnitt 3.2 folgen die leuchtenspezifischen Parameter. Die Steuerungsmöglichkeiten werden ebenfalls beschrieben.

#### 3.1 Systemkonzept

Die Optimierung der Flächenausleuchtung, hier eines LCDs, soll durch eine LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum realisiert werden. Der Sensor oder die Sensoren werden vor, hinter oder getrennt von dieser Oberfläche angebracht. Die Messwerte, wie z. B. Lichtstärke, Farbtemperatur, Farbwiedergabeindex, werden für die Regelung der LED-Leuchte verwendet. Die LED-Leuchte kann über Software individuell auf die Bedürfnisse des Anwenders eingestellt werden. Auf diese Art und Weise kann die Blaulichtemission der Hintergrundbeleuchtung in den Morgen- und Abendstunden signifikant reduziert werden, das heißt ein tagesverlaufsähnlicher Beleuchtungszustand kann z. B. an den Biorhythmus des Benutzers angepasst werden. Dies soll zu einer Steigerung des Wohlbefindens und der Konzentrationsfähigkeit des Menschen führen. Dabei ist zu beachten, dass durch die Anpassung des steuerbaren Farbspektrums der Kontrast sinkt und die Farbtemperatur abnimmt.



Abb. 3-1: Pflanzenbeleuchtung (links Tageslichtleuchte, rechts Pflanzenlichtleuchte)

Eine steuerbare Beleuchtung kann unter anderem auch die Wachstumsbedingungen bei Pflanzen (Abb. 3-1) beeinflussen und in der Tierhaltung für bessere Lebensbedingungen eingesetzt werden. Auch kann ggf. der Prozessablauf bei natürlichen und synthetischen, organischen und anorganischen Stoffumsätzen (z. B. Kläranlage, Molkerei, Brauerei) positiv beeinflusst werden. Das Ziel des gewählten Systemkonzeptes ist es, mit einer

kritischen Auseinandersetzung weiterführende Erkenntnisse für die Beurteilung der Blaulichtemission zu erlangen. Die Modellierung des Versuchsaufbaus, die Auswahl und Verwendung der Komponenten sowie die Vorgehensweise bei der Erfassung und Auswertung von Daten ist auch ein Ansatzpunkt für anknüpfende Forschungsarbeiten. Die LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Betrachtung der Vermeidung von Blaulichtemission und eine Grundlage für weiterführende Überlegungen.

## **3.2 Leuchtenspezifische Parameter und Ansteuerung der LED-Leuchte**

Für die Hintergrundbeleuchtung mit einem steuerbaren Farbspektrum müssen zwei wesentliche Dinge erfüllt sein. Zum einen muss das Farbspektrum der LED-Leuchte möglichst nah an das Farbspektrum einer Hintergrundbeleuchtung herankommen. Zum anderen muss mit der LED-Leuchte ein möglichst hoher CRI (am besten  $R_a = 100$ , Sonnenlicht) erreicht werden. Diese Randbedingung für die Realisierung eines solchen Beleuchtungssystems stellt eine große Herausforderung dar. Das Lichtspektrum des Sonnenlichts besitzt unter anderem UV- und Infrarot-Anteile. In der LED-Leuchte werden diese Bereiche nicht realisiert und damit zugleich die hautschädigenden Bestandteile der Lichtstrahlung vermieden. Die Umsetzung des Lichtspektrums der LED-Leuchte, ähnlich der einer herkömmlichen Hintergrundbeleuchtung, wird durch eine Auswahl von geeigneten LEDs erzeugt, wobei ein sehr hoher CRI angestrebt wird.

Die Steuerung der LED-Leuchte wird mit Hilfe eines Micro-Controllers realisiert, der die Ansteuerung und Umsetzung der Steuerbefehle übernimmt. In Abschnitt 3.2.1 werden mehrere Steuerungsmöglichkeiten dargestellt. Die Beschreibung eines Steuerungskonzeptes, wie es bei Leuchten-Steuerungen eingesetzt werden kann, folgt in Abschnitt 3.2.2. In Abschnitt 3.2.2.1 werden die Ansteuerung und der Betrieb einer LED mit Hilfe einer Konstantstromquelle (KSQ) beschrieben. Es folgen die Ausführung eines Anschlusses einer LED an einen PWM-Dimmer (Abschnitt 3.2.2.2) und die Erklärung der Steuerungsmöglichkeit von LEDs mit Hilfe von DMX (*Digital Multiplex*) für den professionellen Bühnenbereich (Abschnitt 3.2.2.3). Zum Schluss folgt in Abschnitt 3.2.3 eine Auswahl der Steuerungsmöglichkeit und des Zusammenspiels der Komponenten.

### **3.2.1 Auswahl der Steuerungsmöglichkeiten**

Zur Auswahl der Steuerung der LEDs werden vier relevante Steuerungsmöglichkeiten näher betrachtet und analysiert, 1-10V Lichtsteuerung, DALI, DMX und KNX.

### 1-10V Lichtsteuerung

Eine einfache Möglichkeit, LED-Netzteile anzusteuern, ist die 0-10V oder 1-10V Lichtsteuerung. Jede LED-Leuchte hat ein LED-Netzteil, ein elektronisches Vorschaltgerät (EVG) oder sogar Dimm-EVGs. Diese bekommen von den Schaltaktoren oder einem Widerstandsdimmer über eine „1...10V Steuerleitung“ ein störungssicheres Gleichspannungssignal von maximal 10 V (maximale Helligkeit, Steuerleitung geöffnet) bis minimal 1 V (minimale Helligkeit, Steuerleitung kurzgeschlossen). Die LED-Netzteile regeln den Strom für die angeschlossenen LEDs separat.

### DALI

DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) gilt als Standard für dimmbare EVGs und wird von vielen Herstellern verwendet. Für den Anschluss an ein DALI-EVG wird eine fünfadrigere Leitung benötigt (Phase, Neutralleiter, Schutzleiter und zwei Steuerleitungen für das DALI-Protokoll). Es lassen sich bis zu 64 Geräte einzeln steuern.

### DMX

Bei DMX wird ein symmetrisches Übertragungsverfahren der Steuersignale verwendet. Es basiert auf RS-4485 (Industriestandard für die asynchrone serielle Datenübertragung). Als Steuerleitung wird in der Regel ein dreiadriges Kabel eingesetzt. Es gibt eine Erweiterung DMX512-A, in der eine weitere Nutzung von fünfadrigen Kabeln vorgesehen ist. Je nach Ausstattung können mit DMX bis zu 512 Kanäle einzeln angesteuert werden. Jedes angeschlossene Gerät bekommt eine Adresse, die in der Steuerungssoftware hinterlegt wird. Die angeschlossenen Geräte können auch mehr als nur einen Kanal nutzen, wenn sie über mehrere Funktionen verfügen (z. B. Licht an, aus, dimmen, Farbwechsel, etc.). Für die einwandfreie Signalübertragung wird das Ende der Steuerleitung mit einem Terminator-Widerstand abgeschlossen.

### KNX

Zur Gebäudeautomation kann KNX, ein Feldbus (Bussystem), der Nachrichten mehrerer Kommunikationsteilnehmer über eine Leitung sendet, eingesetzt werden. Es beruht auf dem ähnlich verfügbaren Standard des Europäischen Installationsbusses (EIB), ein kommunizierendes System vieler Sensoren und Aktoren im Haushalt. KNX wird parallel zur Elektroinstallation eingesetzt. Das KNX-Steuerungsnetz wird mit 29 V Gleichspannung betrieben. Zwischen Netzspannung und Verbraucher wird ein Aktor eingebaut. Der Aktor erhält von einem Sensor oder einem Computer den Befehl, die Netzspannung

an den Verbraucher durchzuschalten. Es können mehr als 10.000 Geräte gesteuert werden.

Die wesentlichen Eigenschaften von 1-10V Lichtsteuerung, DALI, DMX und KNX sind in Tab. 3-1 aufgelistet.

	Kanäle	Adressierung	Geräte Rückmeldung	PC-Steuerung
<b>1-10V Lichtsteuerung</b>	1	nein	nein	nein
<b>DALI</b>	64	ja	möglich	ja
<b>DMX</b>	512	ja	möglich	ja
<b>KNX</b>	über 10.000	ja	ja	ja

Tab. 3-1: Übersicht der Steuerungsmöglichkeiten

Es gibt viele Funktechniken wie z. B. *EnOcean*, *ZigBee*, *Z-Wave* oder *HomeMatic* für die Steuerung von Hausautomation. Eine Funksteuerung kommt aufgrund möglicher Störanfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern nicht zum Einsatz. Es kann zum Übersprechen der Funk-Signale auf die zu entwickelnden LED-Hintergrundbeleuchtung kommen.

### 3.2.2 Beschreibung

Die Ansteuerung einer mehrkanalfähigen LED-Leuchte kann mit vielen verschiedenen Techniken realisiert werden. Es werden drei Komponenten beschrieben, die für eine Steuerung einer mehrkanalfähigen LED-Leuchte benötigt werden. Dazu zählt der Betrieb einer LED an einer Konstantstromquelle (KSQ-Steuerung), das Dimmen einer LED mit Pulsweitenmodulation (PWM) und die DMX-Steuerung für die Verwendung vieler Lichtkanäle.

#### 3.2.2.1 KSQ-Steuerung

Eine Konstantstromquelle (KSQ) ist eine elektronische Schaltung, die eine nahezu ideale Stromquelle darstellt. Unabhängig von der angelegten Eingangsspannung speist sie einen konstanten Strom in einen Stromkreis. Ändert sich die Last (z. B. eine Änderung des Widerstands) oder die Spannung über der Last, bleibt der Strom durch die Last konstant. Je nach Bauart können Konstantstromquellen mit Gleich- oder Wechselstrom betrieben werden.

Konstantstromquellen können daher ideal als Treiber für LEDs und CCFLs eingesetzt werden, da LEDs einen konstanten Strom benötigen. Die KSQ (z. B. Mini-Buck der Firma *LED-TECH*, Abb. 3-2, Abb. 3-3) verfügen über folgende Eigenschaften:

- Variable Eingangsspannung z. B. 6 – 36 V DC,
- konstanter Ausgangsstrom z. B. 350 mA.

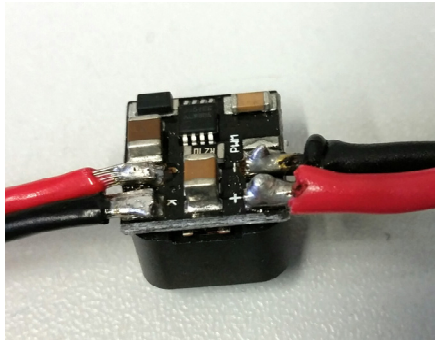


Abb. 3-2: Mini-Buck

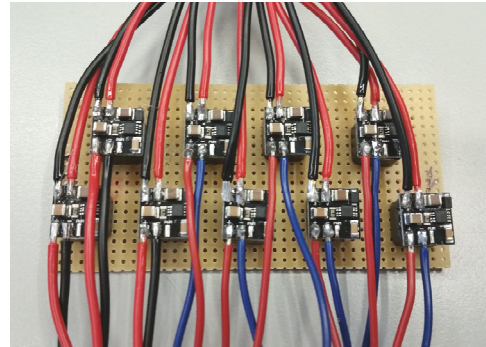
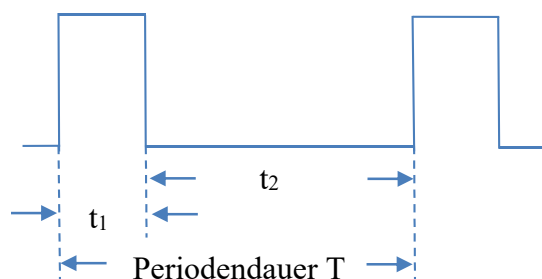


Abb. 3-3: neun Mini-Bucks auf einer Platine

Der Vorteil von Konstantstromquellen ist die Anpassung der Ausgangsspannung an den angeschlossenen Verbraucher. Somit können mehrere LEDs in Reihe geschaltet werden. Der Strom bleibt z. B. bei den Mini-Buck der Firma *LED-TECH* konstant bei 350 mA und die Ausgangsspannung passt sich der Anzahl der LEDs an.

### 3.2.2.2 PWM-Dimmer

Beim PWM-Dimmer wird über ein PWM-Signal die Stromquelle ein- und ausgeschaltet. Durch die hohen Schaltzyklen der LEDs beim An- und Ausschalten lassen sich LEDs mit einem PWM-Dimmer sehr komfortabel in ihrer Helligkeit durch Variation des Tastverhältnisses von  $t_1$  zu  $t_2$  regeln.

Abb. 3-4: Tastverhältnis  $t_1$  zu  $t_2$ 

Durch die Änderung des  $Tastgrads = \frac{t_1}{T}$  (Abb. 3-4) kann die Leistung an einer LED in sehr kleinen Schritten gesteuert werden. Dazu wird die Pulsbreite  $t_1$  modifiziert. Die



minimale Pulsbreite ist von der maximalen Bit-Anzahl eines Kanals abhängig. In dem verwendeten DMX-LED-Dimmer X9 HR (Abb. 3-5) der Firma *dmx4all* können 65536 Schritte (16 Bit) genutzt werden. Über DMX können diese 16 Bit nur über zwei DMX-Kanäle realisiert werden. Ein Kanal hat 256 Schritte. Der erste Kanal übernimmt die grobe Einstellung, der zweite Kanal bietet die Möglichkeit der Feineinstellung. Damit können beispielsweise die Helligkeitsänderungen in weiten Bereichen kontinuierlich programmiert werden. Die Helligkeitsbereichseinstellung erfolgt in LookUp-Tabellen auf dem DMX-Dimmer, in denen tabellarisch die Parameter der Schritteinstellung einer Dimmerkurve vorgegeben werden.

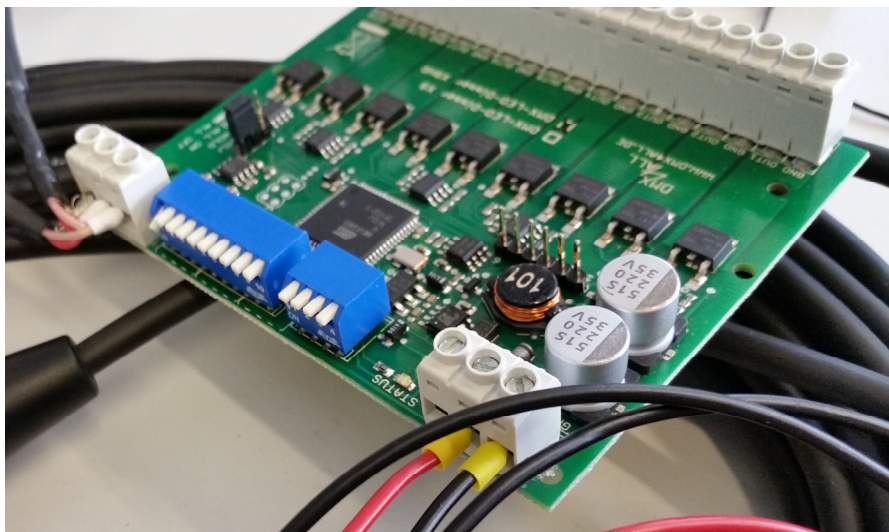


Abb. 3-5: DMX-LED-Dimmer X9 HR

Der DMX-LED-Dimmer X9 HR besitzt neun LED-Kanäle, wobei jeder Kanal einzeln gesteuert werden kann. Des Weiteren kann zwischen zwei Betriebsarten mit oder ohne *High Frequency Mode* gewählt werden. Die Taktung im *High Frequency Mode* kann zwischen 2 und 4 kHz geschaltet werden. Durch die hohe Frequenz wird ein Flimmern der LEDs für das menschliche Auge vermieden. Der Dimmer wird auch im Bereich der Fernsehstudiobeleuchtung eingesetzt, weil die hohe Taktrate nicht mit der Videoaufzeichnungsfrequenz der Fernsehkameras kollidiert und dadurch ein Flimmern der Videobilder vermieden wird (Neudeck, 2015).

Der Flimmereffekt, der insbesondere bei gedimmten LEDs mit PWM auftreten kann, ist aufgrund der negativen Auswirkung auf den menschlichen Organismus (Müdigkeit, Kopfschmerzen und Unwohlsein) zu vermeiden.

### 3.2.2.3 DMX-Steuerung

Die Ansteuerung des PWM-Dimmers übernimmt der „USB-DMX512 PRO“-Controller der Firma *eurolite* (Abb. 3-6). Dieser besitzt auf der Eingangsseite einen USB-Eingang (*Universal Serial Bus*) und auf der Ausgangsseite einen dreipoligen DMXAusgang. Der USB-Eingang kann mit einem PC, Micro-Controller oder einem anderen DMX-Steuergerät verbunden werden.



Abb. 3-6: „USB-DMX512 PRO“-Controller

In der vorliegenden Arbeit wird der DMX-Ausgang mit dem DMX-Eingang des DMX-PWM-Dimmers verbunden. Die Aufgabe des USB to DMX-Controllers ist die Umwandlung der vom PC gelieferten Signale in DMX-Steuersignale.

Abb. 3-7 zeigt in der Übersicht die Komponenten der Lichtsteuerung. Die Lichtsteuerung beinhaltet den USB to DMX-Controller, den PWM-DMX-Dimmer, die Konstantstromquellen (KSQ), den Steuerungsrechner und gegebenenfalls Sensoren z. B. für die Lichthelligkeit und –farbe oder Bewegung. Die Lichtsteuerung wird in Kapitel 5.4 mit der LED-Leuchte (Abschnitt 5.2) verbunden. Des Weiteren kann optional ein Konfigurationsrechner zur Steuerung verwendet werden.



Abb. 3-7: Komponenten der Lichtsteuerung

### 3.2.3 Steuerung

Nach der Recherche für ein kostengünstiges und individuelles Steuergerät für eine LED-Leuchte ist der Einsatz eines Computers aufgrund der möglichen Vielfalt der Verwendung von Softwareprogrammen sinnvoll. Dieser bietet die Möglichkeit über Softwareprogramme verschiedene Licht-Szenarien zu steuern und alternative oder zusätzliche Einstellungen, wie Farbverläufe etc. für die Steuerung mit zu verwalten. Da bei der LED-Leuchte mehrere LEDs individuell angesteuert werden sollen, wird ein Dimmer mit vielen Kanälen verwendet. Der in Abschnitt 3.2.2.2 vorgestellte Dimmer weist neun Kanäle für die Steuerung auf. Somit stehen zusätzlich zu der Steuerung der Rot, Grün, Blau-Mischung sechs weitere Farbkanäle für die Regelung eines steuerbaren Farbspektrums zur Verfügung.

## 4 Hardwaredesign

Für die Schaffung des Hardwaredesigns des Beleuchtungssystems wird in Abschnitt 4.1 eine Übersicht zu Verfügbarkeit und Eigenschaften von LEDs gezeigt. Diese soll die Vielfalt von Standard-LEDs auf dem Markt durchleuchten und helfen, geeignete LEDs auf Starplatinen zu finden. Eine Übersicht über den Leuchenträger und die Stromversorgung der LED-Leuchte wird in den Abschnitten 4.1.1 bzw. 4.2 gegeben.

### 4.1 Auswahl der LEDs

Die Auswahl der verwendeten LEDs wurde im September 2016 durchgeführt. Ein wesentliches Kriterium für die verwendeten LEDs ist die Vergleichbarkeit der Eigenschaften der LEDs mit denen einer Halogenleuchte. Ein wichtiger Beweggrund zur spektralen Nachbildung einer Halogenleuchte ist vor allem, dass eine warmweiße Lichtquelle weniger Blaulichtanteile im Farbspektrum aufweist als eine kaltweiße Lichtquelle.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, für die Vergleichbarkeit von LEDs entsprechend der Eigenschaft von sogenannten Normlichtern Gebrauch zu machen. Es gibt bereits Hersteller, die sich auf Normlichter spezialisiert haben. Einer der Hersteller ist die Firma *GL Optic Lichtmesstechnik GmbH*. Im Produktportfolio dieser Firma findet man die *GL Optic Light LED 127*, ein Normlicht auf Basis von LEDs. Die LED-Normlichtquelle verwendet sechs LEDs mit folgenden Wellenlängen 390, 450, 470, 520, 590, 633 (+/- 10) nm (GLOPTIC, 2016). Die LED-Normlichtquellen besitzen die Eigenschaft einer fast hundertprozentigen Wiedergabe der Standard-Lichtquellen, wie D50, D65, D75, A oder TL84 und die frei wählbaren Lichtspektren (ebd.) innerhalb eines Farbraums.

In der Tab. 4-1 sind die Kenndaten ausgewählter auf Starplatine vorhandener LEDs gegenübergestellt. Die Kenndaten sind aus den Datenblättern der Hersteller entnommen.

Anbieter	Spannung [V]	Strom [mA]	Leistung [W]	Abstrahlwinkel [°]	Leuchtfarbe	Bezeichnung	Wellenlänge [nm]
Avonec	3,30	350	1,155	120	UV-A Schwarzlicht	390 nm – 400 nm UV-A Schwarzlicht 1 W Led auf Starplatine	395 ± 5
Avonec	3,30	350	1,155	120	UV-A / actinic blue	410 nm – 420 nm UV-A / actinic blue 1 W Led auf Starplatine	415 ± 5
Avonec	6,50	350	2,275	120	königsblau	Königsblau / actinic blue 5 W Led auf Starplatine	437,5 ± 2,5
LED-TECH	3,15	350	1,10	125	königsblau	LXML-PR01-0425 auf Aluminium-Platine	447
LED-TECH	3,20	350	1,12	80	königsblau	Oslo SSL 80 LDCQ7P-1U3U	455
LED-TECH	2,70	350	1,02	120	königsblau	GD CSSPM1.14 SSL 120 (Horticulture)	455
Avonec	3,30	350	1,155	120	blau	455 nm – 465 nm Blau 1 W Led auf Starplatine	460 ± 5
LED-TECH	3,20	350	1,12	80	blau	Oslo SSL 80 LBCP7P-GYHY (GY)	470
LED-TECH	3,15	350	1,10	160	blau	LXML-PB01 auf vergoldeter Platine	470
LED-TECH	3,20	350	1,12	80	grün	Oslo SSL 80 LVCK7P-JYKZ (KX)	505
Avonec	3,30	350	1,155	120	grün	515 nm – 525 nm Grün 1 W Led auf Starplatine	520 ± 5
LED-TECH	3,20	350	1,12	80	grün	Oslo SSL 80 LTCP7P-KXKZ (KZ)	528
LED-TECH	3,20	350	1,12	80	grün	Oslo SSL 80 LTCP7P-KXKZ (KZ)	528
LED-TECH	3,20	350	1,12	130	grün	Cree XPEGRN-G4-Q4 auf Star-Platine	535
LED-TECH	2,80	350	1,02	130	gelb / bernstein	Cree XPEBPA-L1-000B01	590 ± 5
LED-TECH	2,00	350	0,70	80	gelb	Oslo SSL 80 LYCP7P-JRJT (JT)	590
LED-TECH	2,90	350	1,02	160	gelb / bernstein	LXML-PL01-0040 auf vergoldeter Platine	590
Avonec	2,30	350	0,805	120	gelb	585 nm-595 nm Gelb 1 W Led auf Starplatine	590 ± 5
LED-TECH	2,10	350	0,74	130	orange	Cree XPERDO-L1-03-P2	612,5 ± 2,5
LED-TECH	2,00	350	0,70	80	gelb / bernstein	Oslo SSL 80 LACP7P-KPKR (KR)	617
LED-TECH	2,10	350	0,74	130	rot	Cree XPERED-L1-R2-N3 auf Star-Platine	622,5 ± 2,5
LED-TECH	2,20	350	0,77	130	rot	Cree XPEBRD-R20-P4 auf Star-Platine	622,5 ± 2,5
LED-TECH	2,20	350	0,77	130	rot	Z-LED P4 Serie, baugleich mit LUXEON Star-LEDs	625
Avonec	2,30	350	0,92	120	rot	620 nm – 630 nm Rot 1 W Led auf Starplatine	625 ± 5
LED-TECH	2,90	350	1,02	125	rot	LXML-PD01-0040 auf Aluminium-Platine	627
Avonec	2,50	350	0,875	120	rot	630 nm – 640 nm Rot 3 W Led auf Starplatine	635 ± 5
LED-TECH	2,30	350	0,81	130	rot (deep red)	Cree XPEPHR-L1-P3-14/15	657,5 ± 2,5
Avonec	2,50	350	0,875	120	Tiefrot / hyper red	660 nm Tiefrot / hyper red 3 W Led auf Starplatine	660
LED-TECH	1,85	350	0,65	80	rot (deep red)	Oslo SSL 80 Oslo SSL 80 GF CS8PM1.24-3S4S-1	730
Avonec	2,50	350	0,875	120	IR	740 nm – 745 nm Infrarot IR 3 W Led auf Starplatine	742,5 ± 2,5

Tab. 4-1: Daten-Übersicht ausgewählter LEDs

Aus der Tab. 4-1 werden die Wellenlängen des emittierten Lichtes  $\lambda_{\text{peak}}$  aller betrachteten LEDs zur besseren Beurteilung in einem Graph dargestellt (Abb. 4-1).

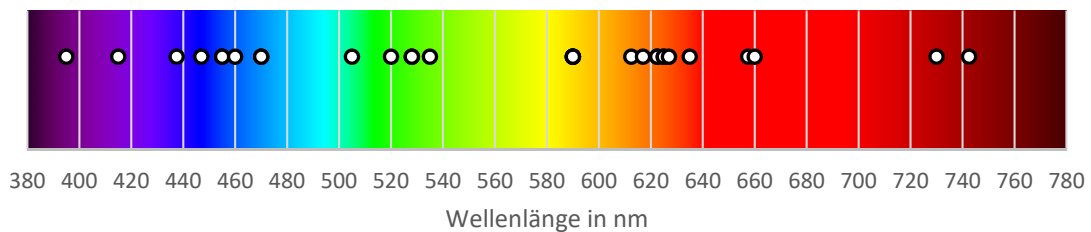


Abb. 4-1: Übersicht Farbverteilung der LEDs

Es ist zu erkennen, dass LEDs nicht im gesamten Spektralbereich Licht emittieren. Dies liegt an den Leuchtstoffen, die bei LEDs für die Farbkonvertierung eingesetzt werden. Bei der Farbkonvertierung wird die LED mit einem Leuchtstoff kombiniert. Über die Auswahl der Menge und des Leuchtstoffs kann theoretisch jede sichtbare Farbe geregelt und erzeugt werden. Es gibt bisher für die LEDs allerdings keine Leuchtstoffe, die alle Farben im sichtbaren Bereich des Lichts emittieren können. Es entstehen sogenannte „Lücken“, also Bereiche mit geringer oder keiner Energieverteilung im Lichtspektrum.

#### 4.1.1 Leuchtenträger

Für die Messung der LEDs wird ein Leuchtenträger benötigt. Die LEDs werden auf eine 4 mm dicke Aluminium-Platte geklebt (Abb. 4-2). Die im Betrieb entstehende Verlustleistung wird über diesen Leuchtenträger abgeführt. Heute haben LEDs einen Wirkungsgrad von ca. 20 % (20 % Licht und 80 % Verlust in Form von Wärme).

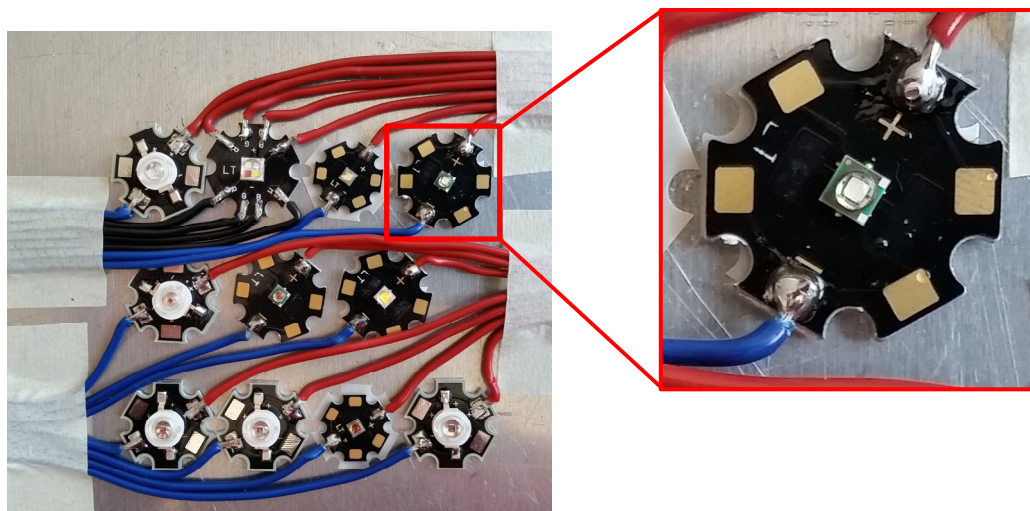


Abb. 4-2: Leuchtenträger mit verschiedenen LEDs

## 4.2 Stromversorgung und Anbindung

Für die Ansteuerung der Stromversorgung von LEDs gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Es können z. B. Gleichstrom - (engl. *direct current* (DC)), Wechselstrom - (engl. *alternating current* (AC)), Stepdown-Converter oder Konstantstromquellen eingesetzt werden. Zur stufenlosen Einstellung der Helligkeit über größere Bereiche können Techniken wie Pulsweitenmodulation eingesetzt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass durch die Pulsweite des Lichtes kein sogenanntes Flimmern (eng. Flicker) entsteht. Die Tab. 4-2 zeigt einige der verschiedenen Stromversorgungsmöglichkeiten.

Typ	Gleichstrom (DC)	Wechselstrom (AC)	dimmbar	Lichtfarbe
Glühlampe	ja	ja	ja	warmweiß
Halogen	ja	ja	ja	warmweiß
Energiesparlampe	nur mit speziellen EVGs	ja	Dimmer abhängig	kalt- und warmweiß
Leuchtstoffröhren	nur mit speziellen EVGs	ja	Dimmer abhängig	kalt- und warmweiß
LED	ja	nur mit Gleichrichter	Dimmer abhängig	kalt- und warmweiß

Tab. 4-2: Leuchten-Typen und ihre Eigenschaften

## 5 Implementierung

Das Kapitel 5 zeigt die elementaren Voraussetzungen für die Anfertigung einer LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum und den Aufbau des Zielsystems. In Abschnitt 5.1 wird die Inbetriebnahme der Testumgebung beschrieben. Darauf wird in 5.2 das Konzept für das Leuchten-Design thematisiert. Der Aufbau des Trägers aus Aluminium und die Anordnung der LEDs auf diesem werden erklärt. In Abschnitt 5.3 werden die Auswahl geeigneter LEDs und deren Wellenlängenbereiche gezeigt. Nach der Vermessung der verwendeten LEDs wird die Ansteuerung für das LED-Beleuchtungssystem im Abschnitt 5.4 in Betrieb genommen. Die Einstellung der Parameter und die Realisierung der Ansteuerung werden im Abschnitt 5.5 beschrieben. Die Konfiguration der LED-Leuchte wird in Abschnitt 5.6 behandelt. Für einen ersten Test wird ein angepasstes gesteuertes Farbspektrum mit den ausgewählten LEDs in der Theorie geschaffen.

### 5.1 Inbetriebnahme der Testumgebung

Die Eigenschaften und Kenngrößen der LED-Leuchte werden mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel (Abb. 5-1) gemessen. Die Ulbricht-Kugel bietet die Möglichkeit, Strahlung von Lichtquellen zu sammeln und den "Lichtstrom" dieser Quellen zu analysieren. Das an die Ulbricht-Kugel angeschlossene Spektrometer nimmt die lichttechnischen Kenndaten wie z. B. Farbtemperatur, Farbwiedergabe oder Beleuchtungsstärke, für weiterführende Auswertungen auf.

Verwendet wird eine im Inneren mit Bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ) beschichtete Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 500 mm der Firma *Opsytec Dr. Gröbel GmbH*. Zweck der  $\text{BaSO}_4$ -Beschichtung ist es, eine möglichst diffus reflektierende Innenbeschichtung zu erreichen. Die Ulbricht-Kugel besteht aus zwei Halbkugeln, damit sie geöffnet und die zu messenden Leuchtmittel eingebracht werden können. Folgende Schnittstellen sind für anzuschließende Messgeräte oder zu messenden Lichtquellen nach außen geführt:

- Eingangport: 30 mm,
- Messport: 30 mm gebaffelt (Baffel = Abschirmung gegen direkte Licht-Einstrahlung in den Messport),
- Zusatzport: 30 mm ungebaffelt,
- Zusatzport: 50 mm (für Hilfslichtquelle).



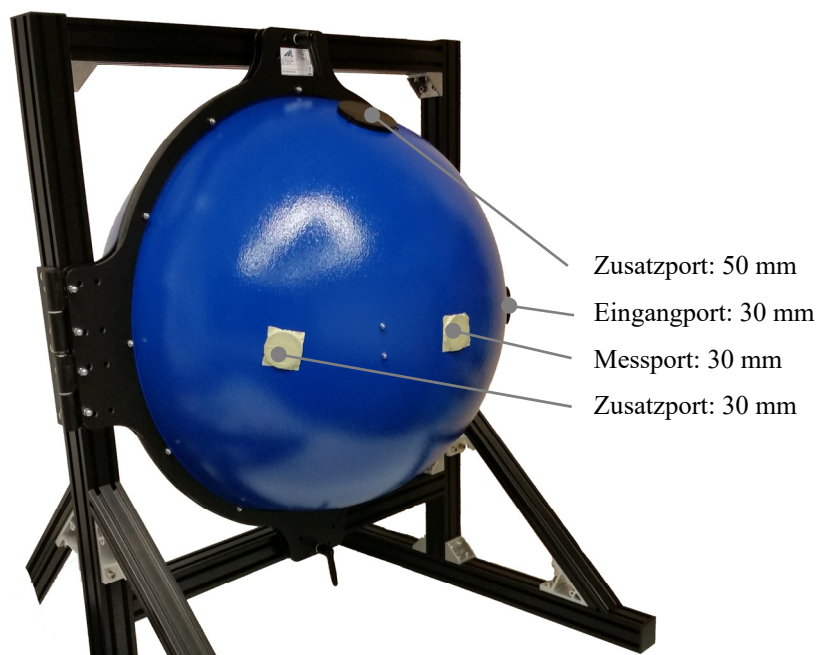


Abb. 5-1: Ulbricht-Kugel

Für die Aufnahme der Messwerte wird das Spektrometer MK350S der Firma *UPRtek* (Abb. 5-2) über den Messport der Ulbricht-Kugel verwendet. Das Spektrometer kann wahlweise per „touch“, per WLAN (*Wireless Local Area Network*) über ein Smartphone, Tablet oder über eine USB-Schnittstelle an einem PC bedient werden. Für diese Untersuchung wird die Variante mit dem PC mit der USB-Schnittstelle verwendet, da der Export von Messdaten direkt erfolgt. Die Messdaten können abgespeichert und für weiterführende Auswertungen verwendet werden.

Abb. 5-2: Spektrometer MK350S der Firma *UPRtek*

Das Spektrometer MK350S verfügt über einen Wellenlängenbereich von 380 – 780 nm. Die spektrale Bandbreite beträgt ca. 12 nm und der Messbereich kann von 20 – 70.000 Lux eingestellt werden. Die Integrationszeit ist von 6 – 5000 ms manuell einstellbar oder eine automatische Anpassung der Integrationszeit wird vom Gerät vorgenommen. Die Integrationszeit ist auf die Lichtstärke der zu messenden Lichtquelle eingestellt. Besitzt diese eine hohe Lichtstärke, wird eine kurze Integrationszeit gewählt, bei niedriger Lichtstärke entsprechend eine lange Integrationszeit. Es sind Einzelmessungen oder Dauermessungen möglich. Die Messeigenschaften sind in Tab. 5-1 aufgeführt. Die Aufnahme und Analyse der Lichtspektren der LED-Leuchten erfolgt mittels der Software *uSpectrum* (Software Stand 2.1.2.4).

Eigenschaften	Spektrometer MK350S
Genauigkeit Helligkeitsmessung	$\pm 5 \%$
Genauigkeit Farbmessung Reproduzierbarkeit Farbmessung	$\pm 0,0025$ in CIE 1931 x,y
	$\pm 0,0005$ in CIE 1931 x,y
Genauigkeit Farbtemperatur CCT	$\pm 2 \%$
CRI Genauigkeit @ R <sub>a</sub>	$\pm 1,5 \%$

Tab. 5-1: Messgenauigkeit bei einer Farbtemperatur von 2856 K und einer Beleuchtungsstärke von 20000 Lux (UPRtek, 2017)

Ergebnisse, die auf Messungen beruhen, sind systematischen und zufälligen Fehlern (Messunsicherheiten) unterworfen. Das Ausmaß einer Fehleranalyse ist in der Regel quantitativ zu erfassen. Da im vorliegenden Fall das Ergebnis qualitativ aus Sicht des Betrachters auf der Matrix-Oberfläche ermittelt wird, reicht es aber aus, angesichts der geringen Größenordnung des zu erwartenden Fehlers des verwendeten Spektrometers (siehe Tab. 5-1) und angesichts des Ziels der Arbeit, eine weitgehende Blaulicht-reduzierung zu erreichen, auf eine detaillierte Fehlerberechnung zu verzichten.

## 5.2 Aufbau der Leuchte

Die LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum setzt sich aus einem Träger aus Aluminium mit aufgeklebten LEDs zusammen.

Das Ziel einer homogen leuchtenden Fläche kann durch mehrere Möglichkeiten erreicht werden (z. B. *PLEXIGLAS*® Platte mit Mikrokristallen, oder ein der Ulbricht-Kugel ähnlicher Aufbau). Die homogene Ausleuchtung einer Fläche ist zwingend für die gleichmäßige Ausleuchtung z. B. eines Bildschirms erforderlich. In dem Messaufbau wird ein der Ulbricht-Kugel ähnlicher Aufbau für die Erzeugung von homogenem Licht

verwendet. Die Option mit einer *PLEXIGLAS®* Platte (wie z. B. *PLEXIGLAS® LED (EndLighten T)*) in Kombination mit einem Diffusor (wie z. B. *PLEXIGLAS® Satinice (Satin Ice)*) wird aus Gründen der verminderten LED-Strahlungsleistung (92,0 % Transmission der *PLEXIGLAS®* Platte und 83,0 % Transmission des Diffusors) nicht weiterverfolgt.

Es bietet sich an, die LEDs auf einen Leuchenträger anzubringen. Da das Lichtspektrum außerhalb der Ulbricht-Kugel vor der beleuchteten Fläche gemessen wird, können die LEDs beliebig platziert werden. Es wird eine Verteilung gewählt, in der grundsätzlich keine gleichfarbigen LEDs nebeneinanderliegen. Aufgrund der räumlichen Randbedingung der HGBSK wird für den Leuchenträger eine Kreisform gewählt und die Anordnung der LEDs in eine Computergrafik übertragen (Abb. 5-3). Anschließend werden die LEDs nach diesem Schema auf eine Aluminium-Platte geklebt (Abb. 5-4).

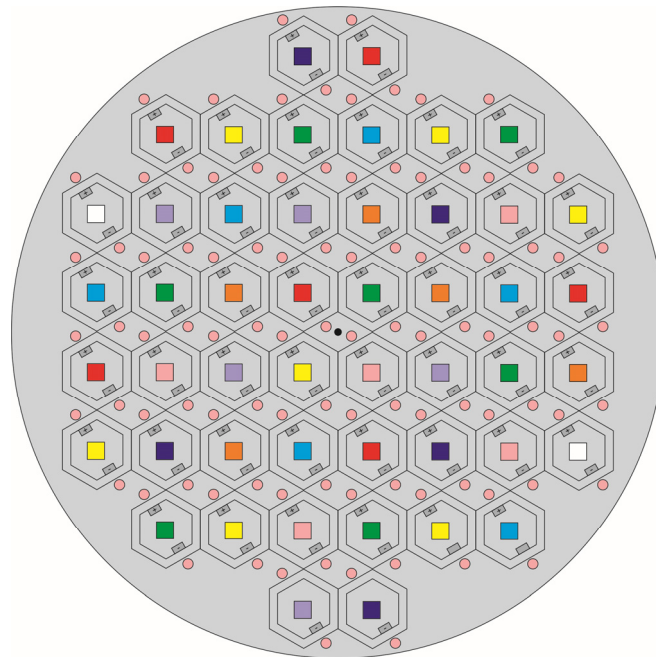


Abb. 5-3: grafische Darstellung der LED-Anordnung auf dem Leuchenträger ( $d = 190 \text{ mm}$ )

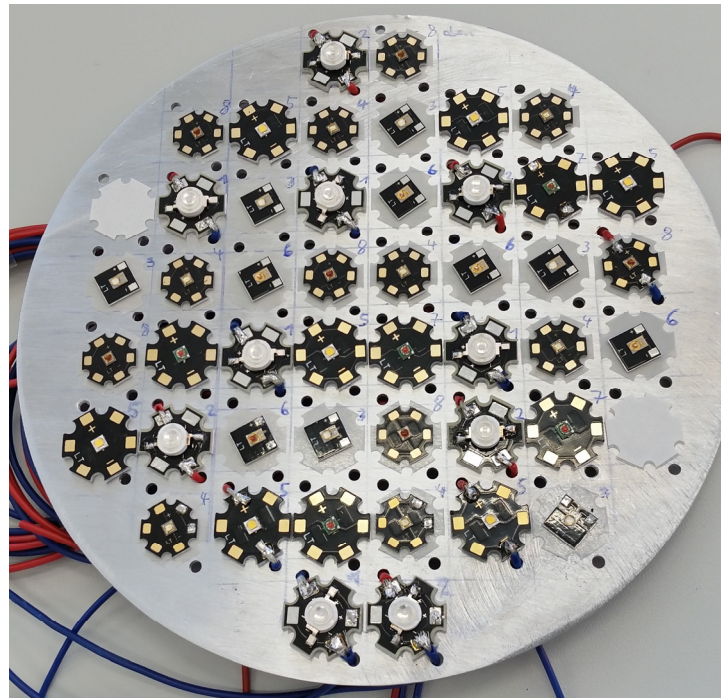


Abb. 5-4: Aluminiumplatte (d = 190 mm) mit applizierten LEDs

Für die Minimierung von Fehlerquellen wird auf der Aluminiumplatte mit den LEDs eine Abdeckung aus Aluminium angebracht (Abb. 5-5).

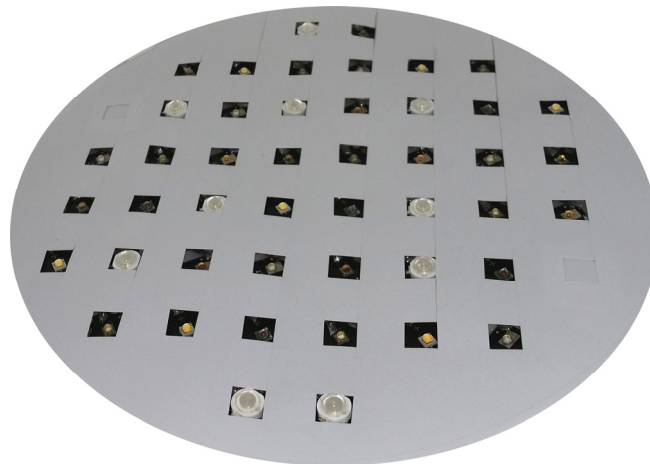


Abb. 5-5: abgedeckte Aluminiumplatte mit LED-Öffnungen

### 5.3 Vermessung der benötigten LEDs

Die Auflistung der verfügbaren Standard LEDs auf Starplatine im Abschnitt 4.1 bildet die Grundlage für die Auswahl der LEDs für die LED-Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum.

Der für das menschliche Auge sichtbare Bereich des Lichts liegt bei einer Wellenlänge zwischen ca. 380 nm und 750 nm. Daher werden folgende LEDs ausgewählt:

- *Avonec*: 390 nm – 400 nm UV-A Schwarzlicht 1W Led auf Starplatine
- *Avonec*: 455 nm – 465 nm Blau 1W Led auf Starplatine
- *Luxeon*: LXML-PB01 auf vergoldeter Platine
- *OSRAM*: Oslon SSL 80 LVCK7P-JYKZ (KX)
- *OSRAM*: Oslon SSL 80 LTCP7P-KXKZ (KZ)
- *Cree*: Cree XPEBPA-L1-000B01
- *Luxeon*: LXML-PD01-0040 auf Aluminium-Platine
- *Cree*: Cree XPEPHR-L1-P3-14/15
- *OSRAM*: Oslon SSL 80 GF CS8PM1.24-3S4S-1

Nicht jede Farbtemperatur kann mit LEDs erzielt werden. Dies ist bedingt durch die unterschiedlich verwendeten Halbleitermaterialien und Dotierungen der LEDs (Saleh & Teich, 2008, S. 853-843). Die verwendeten LEDs sind so gewählt, dass das Lichtspektrum möglichst gleichmäßig abgedeckt wird. Die Colorpeaks der ausgewählten LEDs sind in Abb. 5-6 graphisch dargestellt.

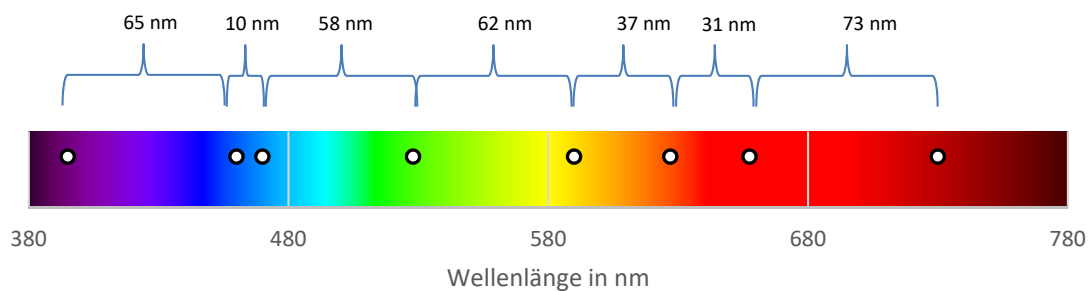


Abb. 5-6: Verteilung und Abstände der *Colorpeaks* der verwendeten LEDs

In einer Ulbricht-Kugel werden die ausgewählten LEDs untersucht. Dabei werden die Werte aus dem Datenblatt der LEDs den gemessenen Werten gegenübergestellt (Tab. 5-2). Die ausgewählten LEDs werden über den Eingangsport einer Ulbricht-Kugel eingekoppelt. Die Kenndaten der LEDs werden über den Messport mit dem Spektrometer MK350S erfasst.

Die ausgewählten LEDs werden mit der Ulbricht-Kugel untersucht und ihre Lichtspektren vermessen. Die zeitgleich gemessenen Größen elektrische Spannung, Strom und Leistung sind in der Tab. 5-2 aufgelistet. Vergleichend sind die Angaben aus den Datenblättern der Hersteller angegeben.

Anbieter	gemessen			Angaben Datenblatt			
	Spannung [V]	Strom [mA]	Leistung [W]	Abstrahlwinkel [°]	Leuchtfarbe	Bezeichnung	Wellenlänge [nm]
Avonec	3,43	350,07	1,20	120	UV-A Schwarzlicht	390 nm – 400 nm UV-A Schwarzlicht 1 W Led	390-400
Avonec	3,39	350,63	1,19	120	blau	455 nm – 465 nm Blau 1 W Led	455-465
LED-TECH	3,12	350,03	1,09	160	blau	LXML-PB01	470
LED-TECH	3,41	349,43	1,19	80	grün	Oslon SSL 80 LVCK7P-JYKZ (KX)	505
LED-TECH	3,38	349,78	1,18	80	grün	Oslon SSL 80 LTCP7P-KXKZ (KZ)	528
LED-TECH	3,01	349,92	1,05	130	gelb / bernstein	Cree XPEBPA-L1-000B01	585-595
LED-TECH	2,17	354,88	0,77	125	rot	LXML-PD01-0040	627
LED-TECH	2,20	352,78	0,77	130	rot (tiefrot)	Cree XPEPHR-L1-P3-14/15	655-660
LED-TECH	2,01	354,68	0,71	80	rot (tiefrot)	Oslon SSL 80 Oslon SSL 80 GF CS8PM1.24-3S4S-1	730

Tab. 5-2: Kennwerte der verwendeten LEDs

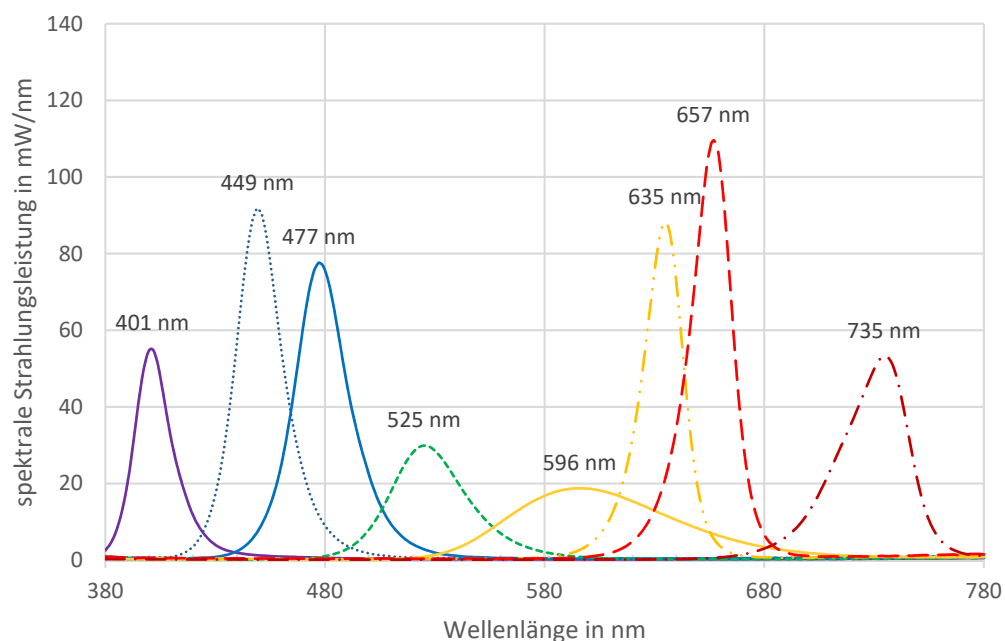


Abb. 5-7: Übersicht der Colorpeaks der verwendeten LEDs

In Abb. 5-7 sind die Lichtspektren der ausgewählten LEDs dargestellt. Das gesamte sichtbare Lichtspektrum von 380 nm – 780 nm wird abgedeckt.

Die verwendeten LEDs haben unterschiedliche maximale Strahlungsleistungen. Aufgrund dieser Unterschiede wird die Anzahl der einzelnen LEDs angepasst. Durch diese Anpassung ist eine gezielte Steuerung der Colorpeaks mit niedrigen Maxima möglich. Somit kann in diesem Bereich eine hohe Strahlungsleistung erreicht und das Farbspektrum variabler gesteuert werden. Die Anzahl der verwendeten LEDs ist in Tab. 5-2 aufgelistet.

Bezeichnung	Wellenlänge [nm]	Anzahl
390 nm – 400 nm UV-A Schwarzlicht 1 W Led auf Starplatine	395 ± 5	5
455 nm - 465 nm Blau 1W Led auf Starplatine	460 ± 5	5
LXML-PB01 auf vergoldeter Platine	470	6
Oslon SSL 80 LTCP7P-KXKZ (KZ)	528	7
Cree XPEBPA-L1-000B01	590 ± 5	7
LXML-PD01-0040 auf Aluminium-Platine	627	5
Cree XPEPHR-L1-P3-14/15	657,5 ± 2,5	5
Oslon SSL 80 Oslon SSL 80 GF CS8PM1.24-3S4S-1	730	6

Tab. 5-3: Übersicht der Anzahl der verwendeten LEDs

## 5.4 Inbetriebnahme der Ansteuerung

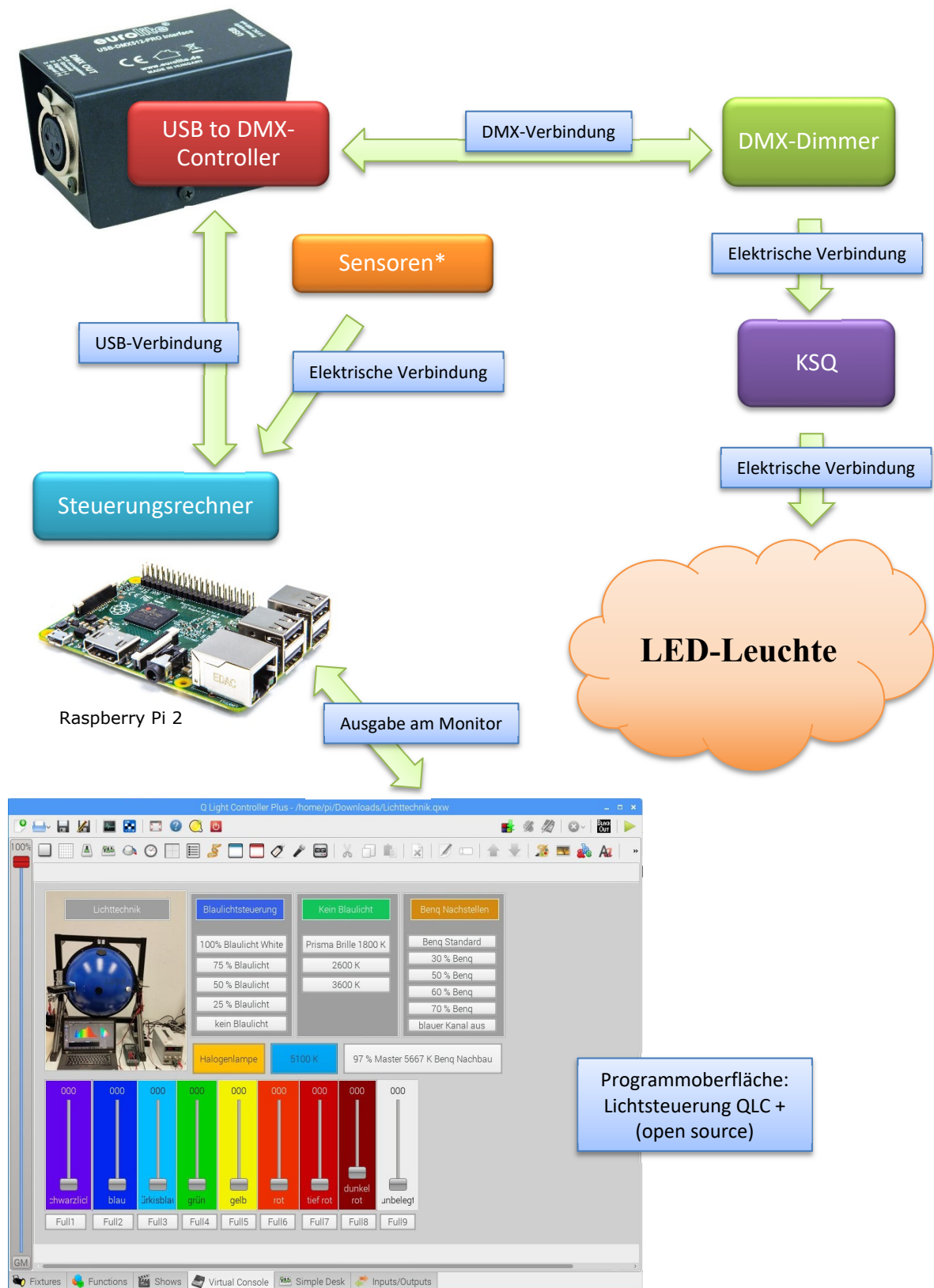
Die technische Ansteuerung einer LED-Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum mit gleichzeitiger Minimierung des Blaulichtanteils im Farbspektrum erfordert in dem gewählten Aufbau folgende Komponenten:

Komponenten	Gewählte Konfiguration
Steuergerät	Raspberry Pi 2 (Einplatinencomputer)
Anbindung Steuerung	USB to DMX Controller (s. Abschnitt 3.3.2.3)
	DMX X9HR Controller mit integriertem Dimmer (s. Abschnitt 3.3.2.2)
	Terminator für die DMX-Steuerleitung (s. Abschnitt 3.3.1)
Spannungs- / Stromversorgung	2 x 24 V Gleichspannungsnetzteil
	5 V Gleichspannungsnetzteil für Raspberry Pi
	KSQ (s. Abschnitt 3.3.2.1)
Leuchtmittel	LED-Leuchte
sonstige	DMX-Kabel
	div. Kabel

Tab. 5-4: Komponenten und Konfiguration



Die Komponenten für die LED-Hintergrundbeleuchtung werden, wie in Abb. 5-8 dargestellt, angeschlossen und mit dem LED-Leuchte verbunden.



\*Sensoren z. B. Bewegungs-, Farb- und Helligkeitssensor

Abb. 5-8: Aufbau der LED-Leuchtensteuerung



Abb. 5-9 zeigt die elektrische Verkabelung aller einzelnen LEDs mit den KSQ (s. Abschnitt 3.3.2.1), der Spannungsversorgung und dem DMX-Controller. Für den störungsfreien Betrieb (Vermeidung von Rückkopplung der PWM-Signale) sind zwei Spannungsquellen vorgesehen: eine Spannungsversorgung für den DMX-Controller, eine zweite Spannungsversorgung für die LED-Leuchte mit 8 LED-Gruppen. Jede LED-Gruppe ist an einem Steuerungskanal des 9-Kanal-Dimmers angeschlossen. Der Kanal 9 bleibt offen.

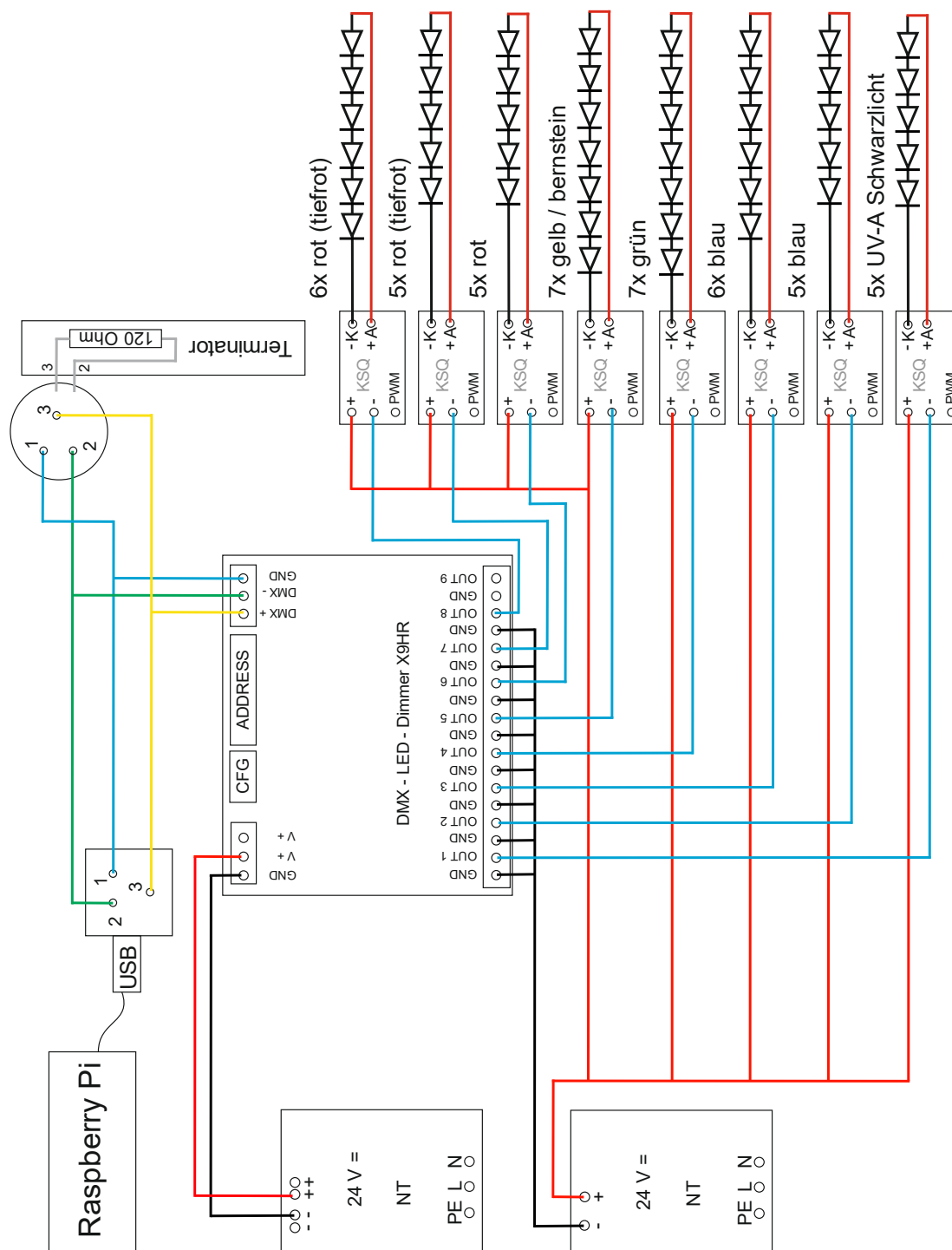


Abb. 5-9: Schaltplan

Für einen definierten Ablauf der Steuerbefehle am 9-Kanal-Dimmer wird die DMX-Geräte-Adresse *1000000000* eingestellt (Abb. 5-10).

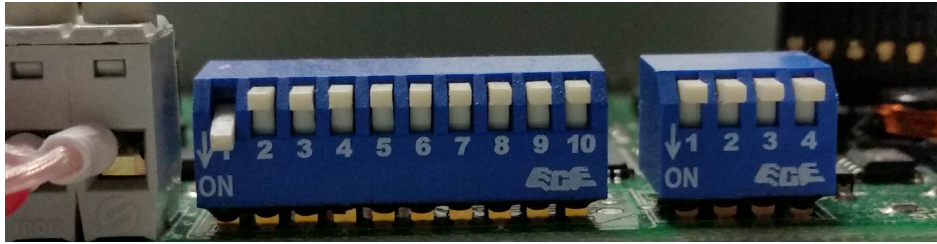


Abb. 5-10: Dipschalter zum Einstellen der DMX-Adresse am DMX-Controller, vgl. Abb. 3-5

## 5.5 Konfiguration der Ansteuerung

Für die Ansteuerung wird das Programm QLC + (*Q Light Controller Plus*) verwendet. Das Programm QLC + benötigt ein Linux-Betriebssystem. Als Hardware wird ein Raspberry Pi 2 eingesetzt, um die Kompilierungszeit gering zu halten. Zunächst muss dieser mit einem Betriebssystem versehen und konfiguriert werden. Dieser Vorgang wird in „Anhang A: Installation von Raspbian Jessie with PIXEL“ erläutert. Anschließend muss auf dem Raspberry Pi 2 eine Lichtsteuerungssoftware installiert werden, was in „Anhang B: Installationsschritte für QLC +“ beschrieben wird. Eine Remote-desktopverbindung von z. B. einem Computer mit Microsoft Windows kann jetzt zum Raspberry Pi 2 aufgebaut („Anhang C: Remoteverbindung zum Raspberry Pi“) und über Eingabemasken die grafische Konfiguration in QLC + vorgenommen werden:

## 1. Auswahl des *Input/Output* Menüs (Abb. 5-11) und Auswahl des Outputs

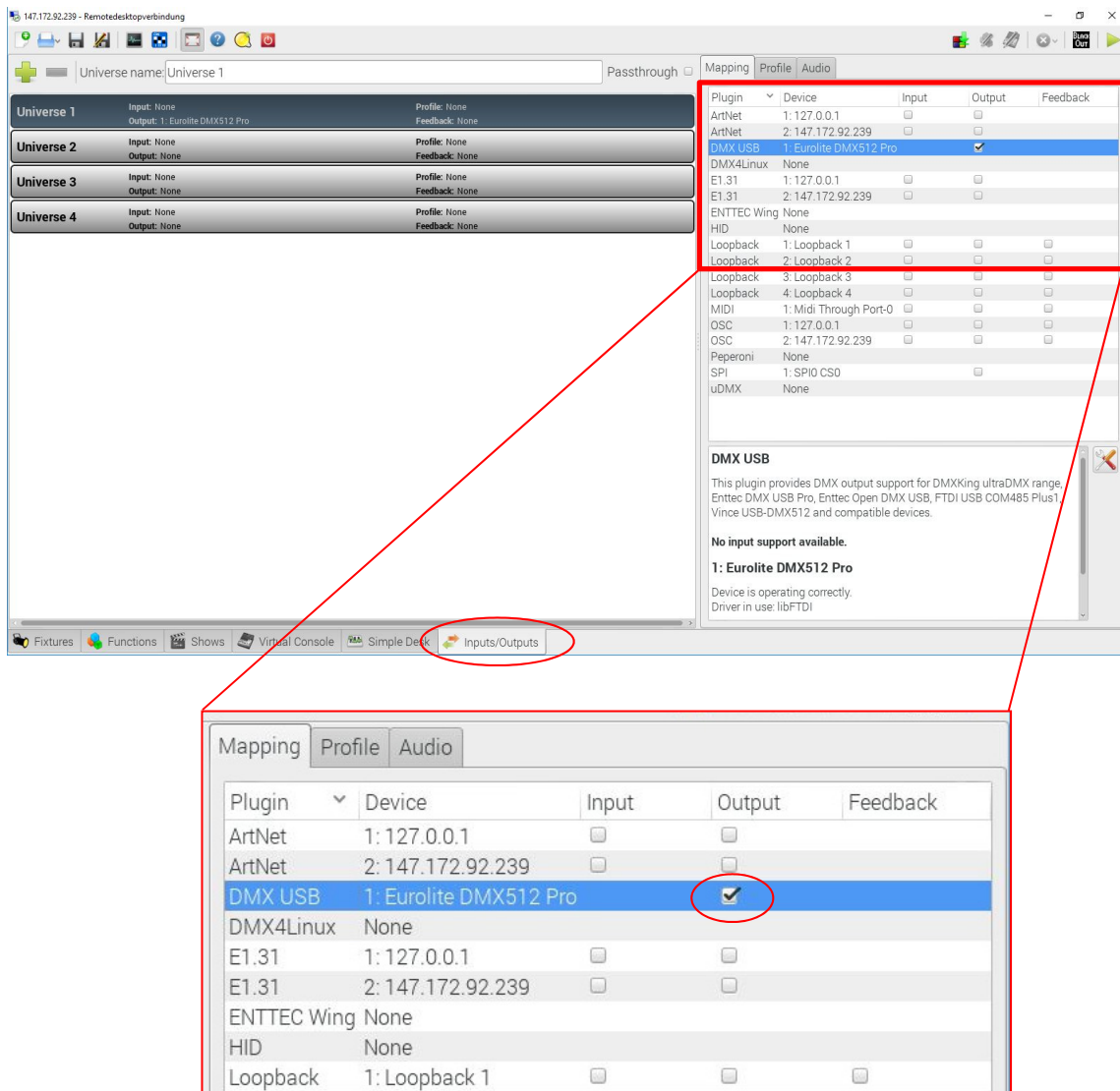


Abb. 5-11: Programmoberfläche von QLC +, Auswahl *Input/Output* Menü

2. In der Registerkarte *Fixture* (Abb. 5-12) wird eine neue *Fixture* (Konfigurationsdatei eines Geräts) mit dem Namen *Dimmer* im ersten *Universe 1* angelegt und die dazugehörige DMX-Adresse *1000000000* des Dimmers eingestellt.

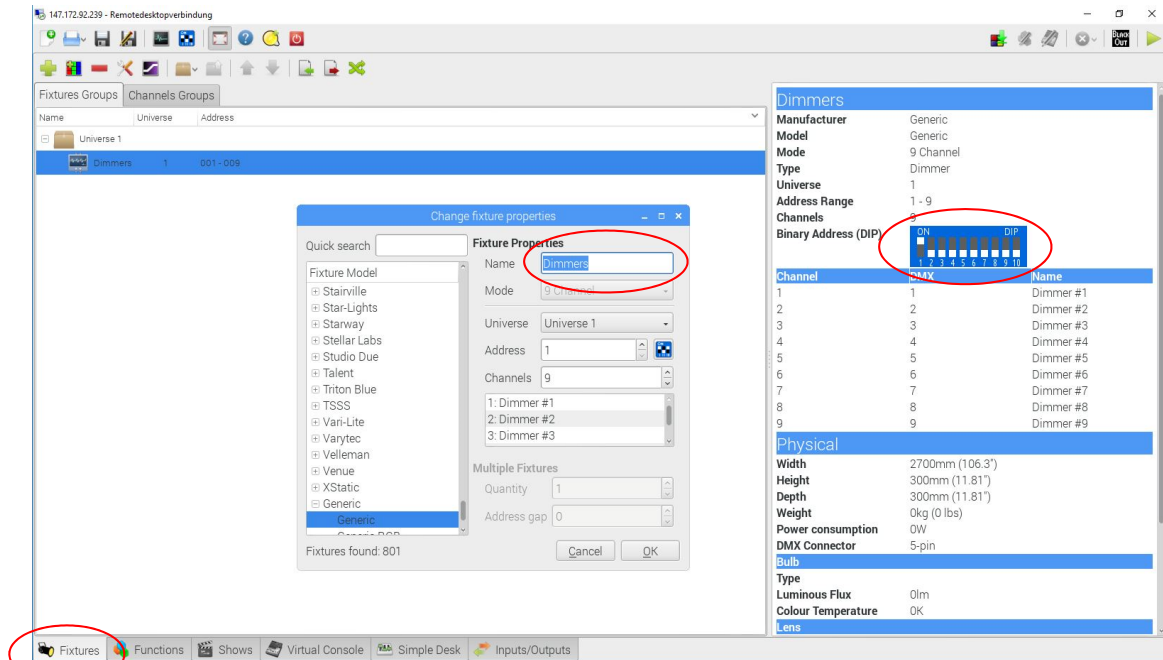


Abb. 5-12: Fixture erstellen in QLC +

Sobald die Konfiguration erfolgreich vorgenommen ist, wechselt die grüne Status-LED am 9-Kanal-DMX-Dimmer von einem *Blinken* auf dauerhaftes *Leuchten*. Jetzt ist der *USB to DMX Controller* korrekt mit dem Dimmer verbunden. Die Konfiguration ist abgeschlossen, und die neun Kanäle können mit dem Programm im Wertebereich von 0-255 gesteuert werden (Abb. 5-13).

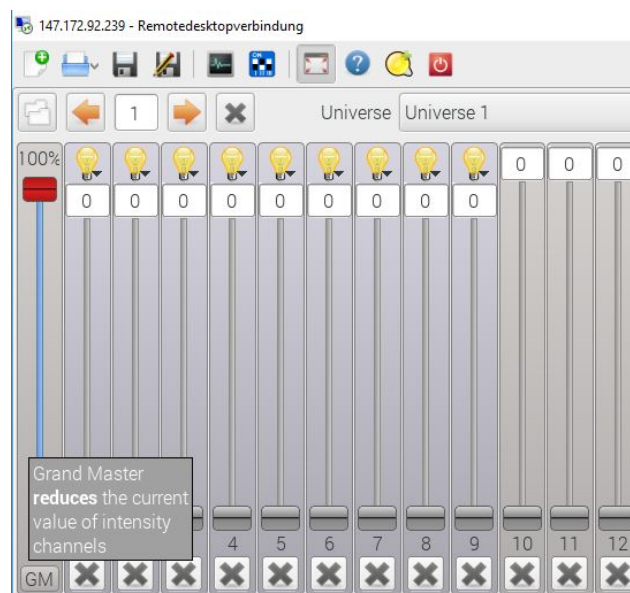


Abb. 5-13: QLC + Single Desk Übersicht

Die Anpassung des Dimmers erfolgt ebenfalls über eine Software (Abb. 5-14): DMX-LED-Dimmer PC-Control (Version V2.1.1).

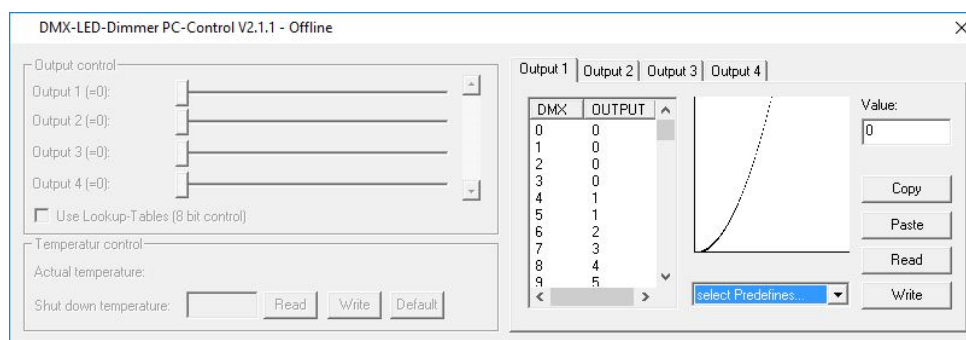


Abb. 5-14: Einstellmöglichkeiten einer Dimmerkurve (Programm PC-Control)

Hier gibt es die Möglichkeit, wie bereits in Kapitel 3.2.2.2 beschrieben, die Dimmerkurve den Eigenschaften des menschlichen Auges nachzuempfinden. Das Auge hat eine annähernd logarithmische Helligkeitskennlinie. Das heißt bei geringer Licht-Helligkeit können kleine Änderungen der Licht-Helligkeit sehr viel besser wahrgenommen werden, als bei großer Licht-Helligkeit. Um das Helligkeitsempfinden des Auges zu berücksichtigen, wird die Steuerung des Dimmers über eine exponentielle Kennlinie realisiert.

## 5.6 Konfiguration der Leuchte

Für die Konfiguration der LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum werden die in Abschnitt 5.3 gemessenen Spektralverläufe verwendet. Mit Hilfe dieser Werte wird eine Gegenüberstellung der LED-Leuchte zu einer Halogenleuchte und einer Hintergrundbeleuchtung mit 5800 K Farbtemperatur durchgeführt.

Die LED-Leuchte sollte in etwa die Farbtemperatur einer Halogenleuchte von 2900 K aufweisen, um verschiedene Beleuchtungsszenarien anschließend besser beurteilen zu können.

Zum Vergleich werden die einzelnen Spektralanteile des Lichts tabellarisch zusammengeführt und in einem Diagramm dargestellt (Abb. 5-15). Die Werte der einzelnen LEDs können jetzt entsprechend der Spektralkurve einer Halogenleuchte angepasst werden. Die Berechnung des CRI erfolgt mit der Software *uSpectrum* (auf die Darstellung der mathematischen Berechnung des CRI (vgl. ASSIST, 2010, S. 12-17) wird an dieser Stelle verzichtet). Nach Einstellen der Spektralkurven der LEDs durch spektrale Addition, entsprechend dem spektralem Verlauf, wie z. B. dem einer Halogenleuchte, werden diese Werte in QLC + übertragen.

Das Ergebnis der Anpassung zeigt Abb. 5-15, in der der spektrale Verlauf der LED-Leuchte dem spektralen Verlauf der Halogenleuchte und der Black-Body-Kurve gegenübergestellt ist. Die Black-Body-Kurve gibt die Farbkoordinaten der vom sogenannten Planck'schen Strahler (schwarzer / idealer Strahler) bei unterschiedlichen Temperaturen abgegebenen Strahlung an. „Grundlage für die Bestimmung der Farbe einer Lichtquelle bzw. der Farbtemperatur ist der Planck'sche Strahler, auch schwarzer Strahler genannt. Der Planck'sche Strahler dient zur Untersuchung von Lichtemissionen von erhitzten Körpern und ist Grundlage der meisten Lichtquellen.“ (Greule, 2014, S. 28) So lassen sich die Farbkoordinaten in Farbtemperaturen übertragen. Zum Beispiel entspricht der Farbort der Strahlung bei 1000 K dem von rotem Licht bei 610 nm.

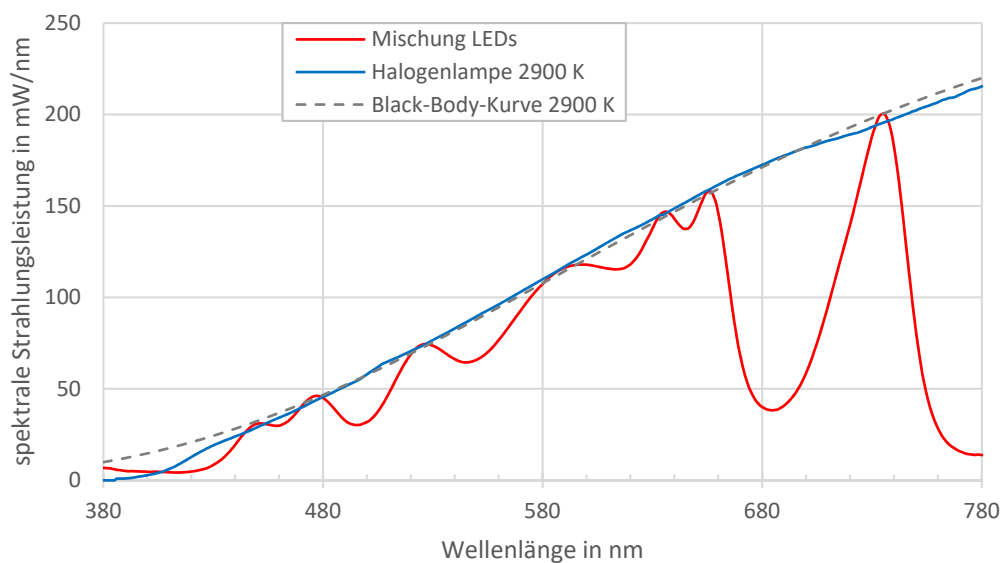


Abb. 5-15: theoretische Gegenüberstellung LED-Leuchte und Halogenleuchte im spektralen Verlauf

Anhand der Strahlungsleistung der verwendeten LEDs wird der spektrale Verlauf einer Halogenleuchte nachgebildet (Abb. 5-15).

Dasselbe Prozedere wird für eine Leuchte mit einer Farbtemperatur von 5800 K, entsprechend der Farbtemperatur eines LED-Backlights in einem Monitor, vorgenommen und in QLC + übertragen (Abb. 5-16).

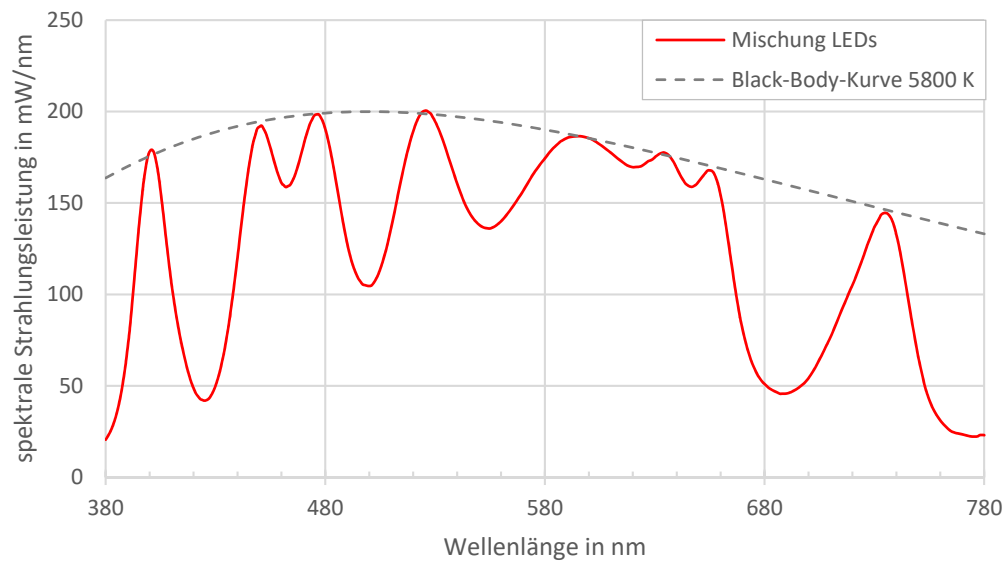


Abb. 5-16: theoretische Gegenüberstellung LED-Leuchte und Leuchte mit 5800 K im spektralen Verlauf

## 6 Evaluation

Die LED-Hintergrundbeleuchtung wird in einem Test im Abschnitt 6.1 auf ihre technischen Werte untersucht. Alle Messwerte werden aufgenommen und erläutert. In Abschnitt 6.2 wird die entwickelte LED-Hintergrundbeleuchtung in Anwendung getestet und die ermittelten Messwerte denen eines Referenz-Monitors gegenübergestellt. Diese Testumgebung besteht aus der LED-Leuchte und einem der Ulbricht-Kugel ähnlichen Nachbau zur homogenen Ausleuchtung einer LCD-Fläche.

### 6.1 Technische Daten

Die LED-Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum und ihrer Steuerung wird mit Hilfe der Ulbricht-Kugel und einem Spektrometer analysiert.

Die in Abschnitt 5.6 ermittelten Werte für QLC + werden aufbereitet und gegebenenfalls angepasst, um das gewünschte Lichtspektrum (z. B. einer Monitor-Hintergrundbeleuchtung mit einer Farbtemperatur von ca. 5800 Kelvin) unter Berücksichtigung eines möglichst hohen CRI ( $R_a > 80$ ) zu erzeugen.

Es werden mehrere Farbkanäle für die Steuerung genutzt, um weißes Licht zu erzeugen (Mischung der Farben). Der Blaulichtanteil wird über die elektrische Leistung der blauen LEDs erfasst. Es werden die gesamte elektrische Leistung und die elektrische Leistung der beiden blauen Kanäle (2 und 3) aufgezeichnet, sodass mit den gewonnenen Daten die Hintergrundbeleuchtung an die gewünschten Blaulicht-Betriebsarten angepasst werden kann. Die Leistung wird mit dem „Energy System Multimeter“ von *METRAHIT* gemessen (METRAHIT, 2017).

Dazu wird der LED-Leuchträger in die Ulbricht-Kugel eingebracht und in Betrieb genommen. Für eine Vergleichbarkeit der Blaulicht-Betriebsarten der LED-Leuchte wird die Beleuchtungsstärke, bei allen Messungen auf etwa 3100 Lux, über die Regler in QLC + eingestellt.

Es werden fünf Betriebsarten untersucht:

1. Normal (weiß),  
Reduzierung der elektrischen Leistung der blauen Kanäle jeweils auf:
  2. 75 % der Nennleistung,
  3. 50 % der Nennleistung,
  4. 25 % der Nennleistung,
5. deaktivierte blaue LEDs.



	Modus	DMX Wertebereich								Farbtemperatur [K]	CRI (Ra)	Beleuchtungsstärke [Lux]	Leistung [W]		
		Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 6	Kanal 7	Kanal 8				Gesamt	Kanal 2 (blau)	Kanal 3 (blau)
	1. Lichtfarbe weiß	0	31	81	105	213	0	0	0	5801	83,5	3115	12,22	0,83	1,98
elektrische Leistung der blauen Kanäle reduziert auf	2. 75 %	0	22	60	118	203	0	22	0	4700	89,9	3109	12,44	0,62	1,49
	3. 50 %	0	13	39	111	211	0	52	0	3773	93,0	3104	12,25	0,42	0,99
	4. 25 %	0	6	18	98	228	0	66	0	3134	98,2	3101	12,06	0,21	0,50
	5. ohne Blaulicht	0	0	0	61	244	96	81	0	1839	94,5	3105	12,32	0	0

Tab. 6-1: Kennwerte LED-Leuchte (gemessen in einer Ulbricht-Kugel bei ähnlicher Beleuchtungsstärke)

Die Farbtemperatur nimmt bei ähnlicher Beleuchtungsstärke und Reduzierung des Blaulichtanteils im Lichtspektrum ab (Tab. 6-1). Mit abnehmender Farbtemperatur steigt der Farbwiedergabeindex (CRI) an (Abb. 6-1), und sogar ohne Blaulichtanteil wird ein sehr hoher CRI ( $R_a > 90$ ) erreicht. Die gesamte elektrische Leistung bleibt über alle eingestellten Betriebsarten, auch bei Deaktivierung des Blaulichtanteils, nahezu konstant. Bei abnehmender Farbtemperatur muss mehr Rotlichtanteil aktiviert werden. Die Lichtausbeute (lm/W) ist bei roten LEDs geringer als bei blauen LEDs. Durch die unterschiedlich verwendeten Halbleitermaterialien und Dotierungen strahlt eine LED in vermehrter Form langwelliges Licht ab. Dabei wird die Strahlungsleistung einer LED reduziert, allerdings wird mehr elektrische Energie für dieselbe Menge Licht benötigt.

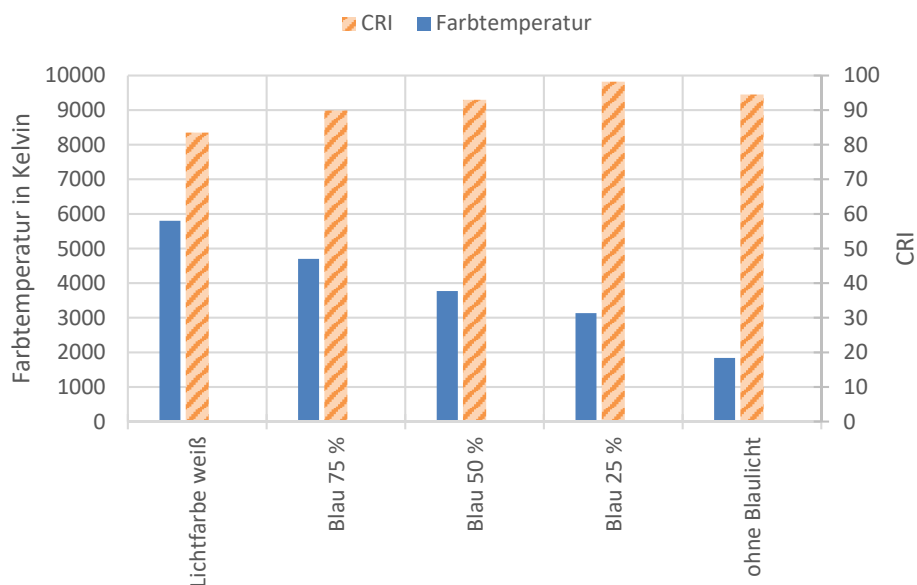


Abb. 6-1: Darstellung der Betriebsarten der LED-Leuchte bei ähnlichster Helligkeit

Der Vorteil der Verwendung mehrerer LEDs bei einer Hintergrundbeleuchtung liegt in der gezielten Ansteuerung einzelner LEDs und der damit verbundenen variablen Einstellmöglichkeit der Farbtemperatur, was gleichermaßen zu einer Erhöhung des CRI führt. Um den besten CRI zu erreichen, müssen die LEDs in Kombination möglichst das volle Farbspektrum abdecken. Das Dimmen oder das gezielte Abschalten einzelner LEDs ist daher sinnvoll und wird im Folgenden für die Optimierung der Hintergrundbeleuchtung verwendet.

In Abb. 6-2 sind die fünf Betriebsarten der LED-Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum (Tab. 6-1) im spektralen Verlauf dargestellt.

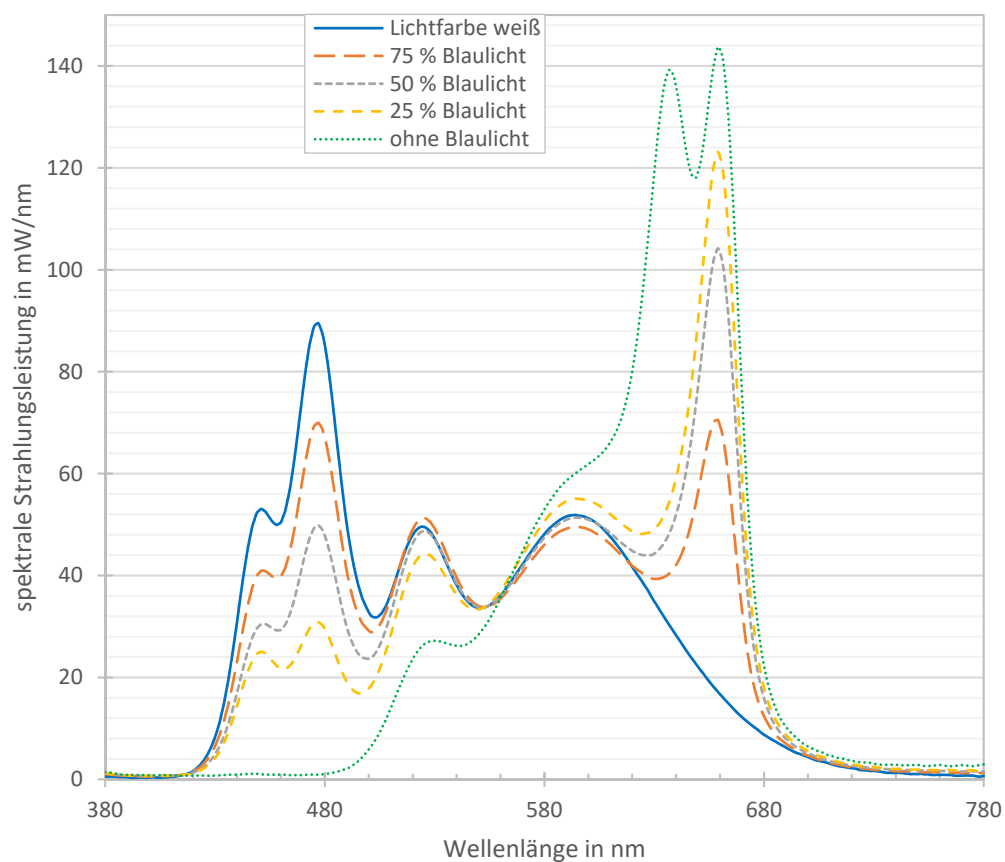


Abb. 6-2: Übersicht Lichtspektren der LED-Leuchte in fünf untersuchten Betriebsarten

Die Abnahme der Strahlungsleistung der blauen Kanäle ist deutlich zu sehen. Bei Reduzierung der Nennleistung der blauen LEDs kommt es zur Abnahme der Farbtemperatur (Abb. 6-1). Daher muss die Strahlungsleistung im Bereich ab ca. 600 nm erhöht werden, um dem Farbtemperaturverlauf auf der Black-Body-Kurve zu folgen (Abb. 6-3). In der Betriebsart ohne Blaulichtanteil beginnt der spektrale Verlauf erst bei ca. 480 nm (grüne Kurve).

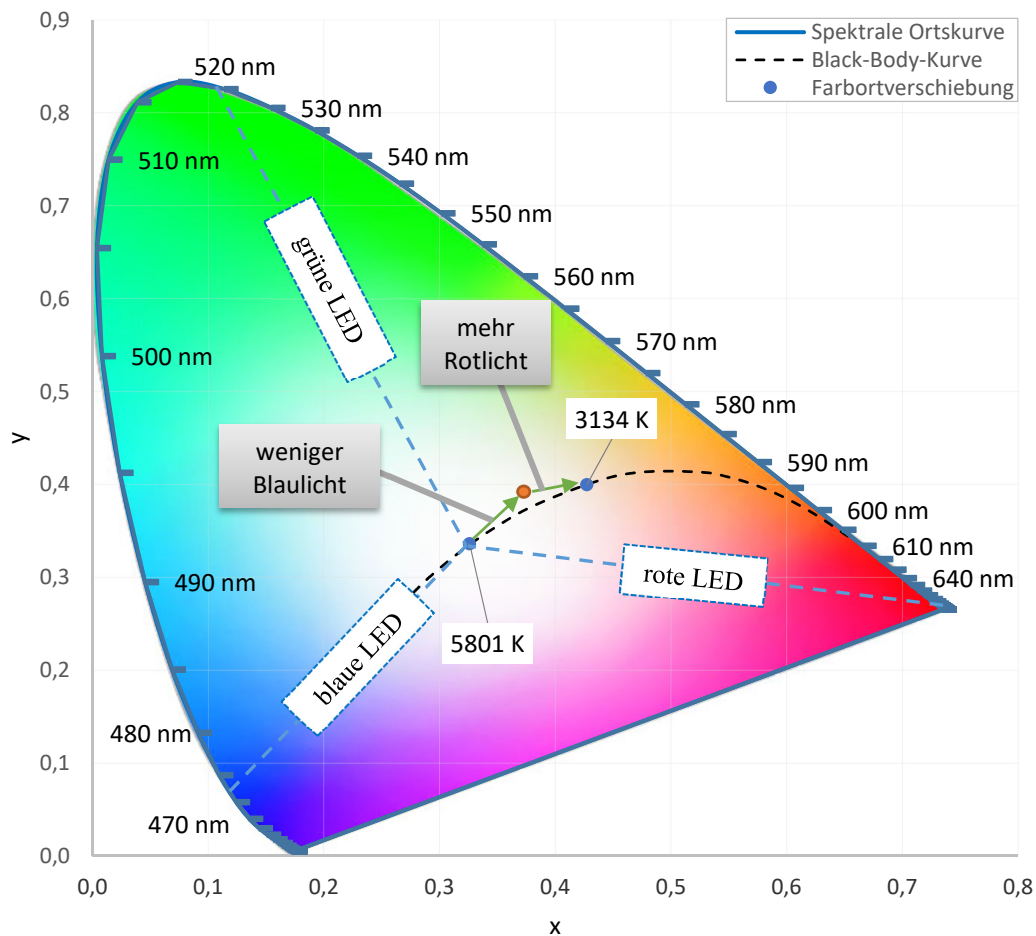


Abb. 6-3: Farbortverschiebung von 5801 K nach 3134 K

Die Warmlaufphase der LED-Leuchte, bis zum Erreichen der Betriebstemperatur, ist mit 60 Sekunden relativ kurz, danach sind keine Leistungsänderungen mehr messbar (Abb. 6-4).

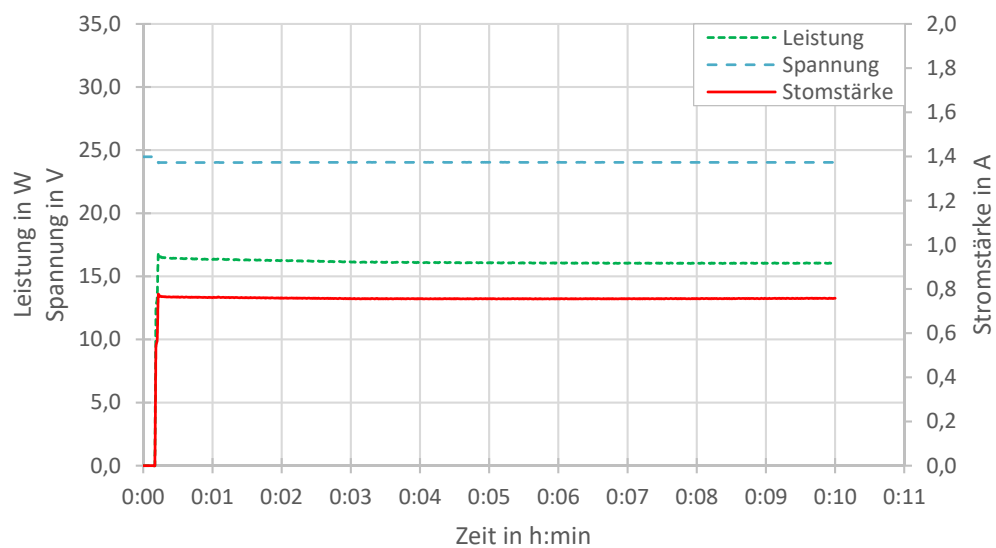


Abb. 6-4: Warmlaufphase der LED-Leuchte

## 6.2 Testumgebung mit HGBSK

Für die Untersuchung der LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum wird eine HGBSK (Hintergrundbeleuchtungssimulatorkugel) hergestellt (Abb. 6-5). Mit Hilfe dieses Aufbaus können Flächen, z. B. LCDs, Glas- und Kunststoff-Platten, homogen beleuchtet werden. Die HGBSK besteht aus der Nachbildung einer Ulbricht-Kugel aus Styropor. Diese bietet genügend Platz für die Aufnahme der LED-Leuchte sowie deren Ansteuerung. Zusätzlich ist eine Öffnung zur Beleuchtung eines LCDs (LCD 1), hier ein LCD aus einem *Benq* BL2205 Monitor, vorgesehen.

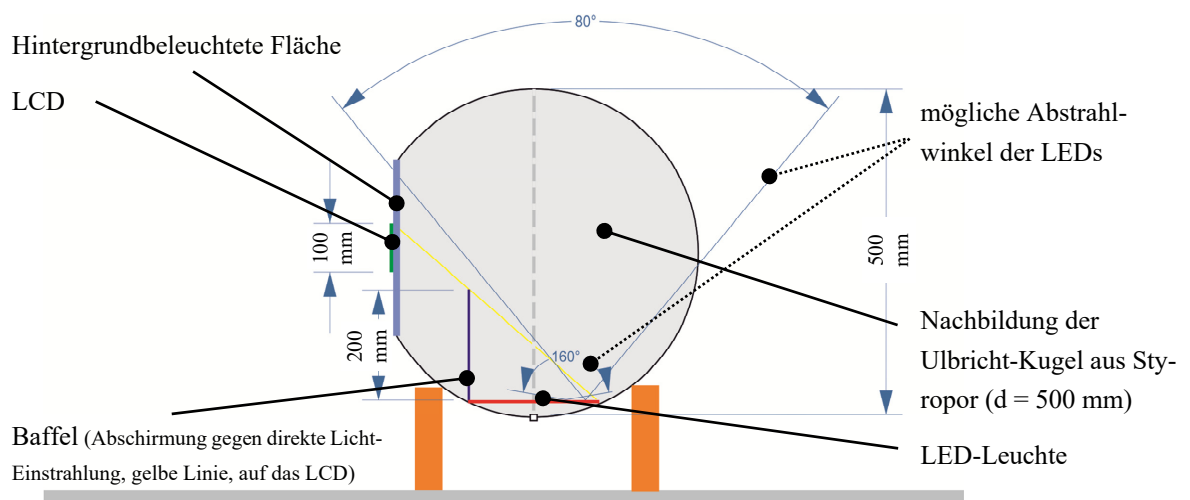


Abb. 6-5: Aufbau HGBSK (Querschnitt)

Ein zweites baugleiches Modell des Monitors *Benq* BL2205 (LCD 2) ist für Vergleichsmessungen vorgesehen.

In der HGBSK wird die zu untersuchende Leuchte (siehe Abschnitt 5.2) eingebaut und mit der Steuerung und der Stromversorgung verbunden (Abb. 6-6, Abb. 6-7).

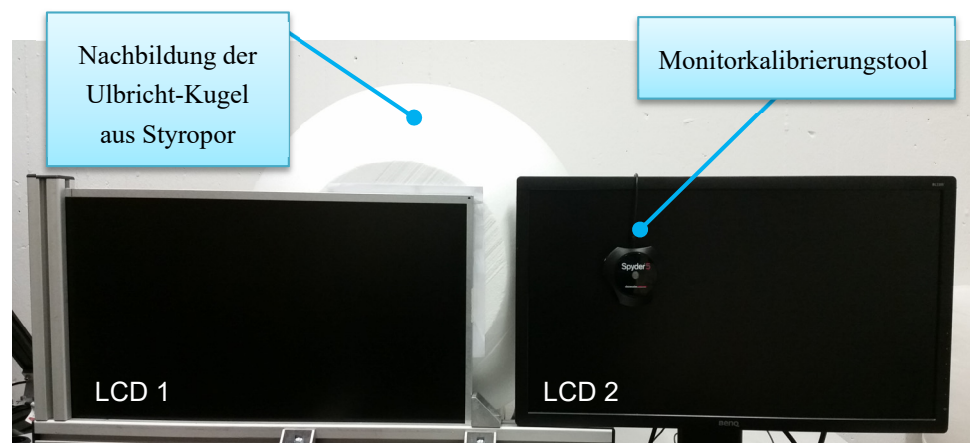


Abb. 6-6: Messplatz mit der HGBSK

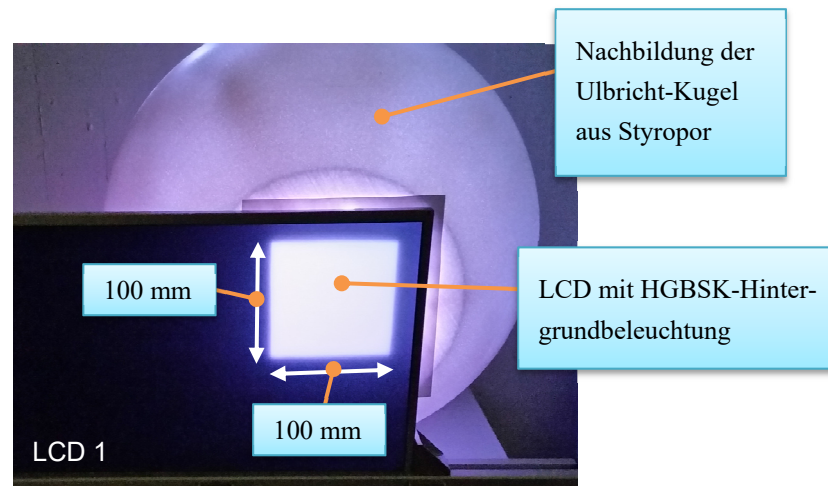


Abb. 6-7: HGBSK in Betrieb

Die normierten Lichtspektren (Abb. 6-8) einer Ulbricht-Kugel, einer Styropor-Kugel und einer mit Bariumsulfat behandelten Styropor-Kugel sind fast identisch. Für die Messung der Differenzen wird eine warmweiße *OSRAM* Oslon SSL LED mit 2535 K und einem CRI von 95,8 (in der Ulbricht-Kugel gemessen) verwendet.

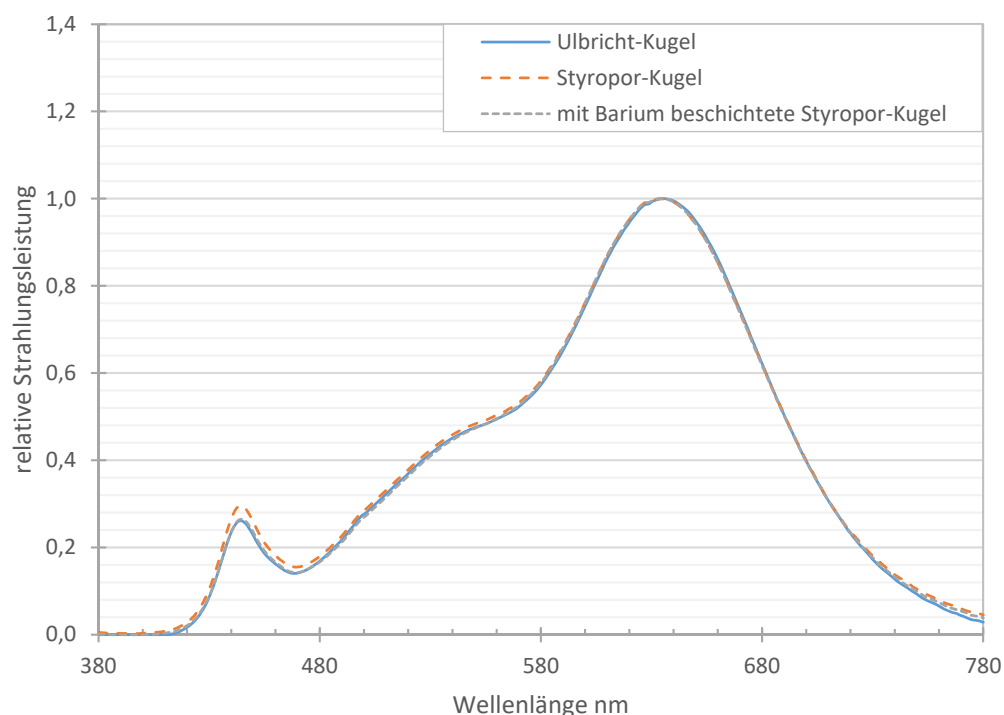


Abb. 6-8: Spektraler Verlauf der verschiedenen Beleuchtungs-Kugeln

Bei der Betrachtung der relativen Strahlungsleistung ist der spektralen Verlauf der drei verschiedenen Kugeln ähnlich. Lediglich der spektrale Verlauf des Lichtspektrums der Styropor-Kugel weicht geringfügig von dem der Ulbricht-Kugel ab. Die Ursache liegt in der Oberfläche der Styropor-Kugel. Diese wirkt nicht als Diffusor.

Dies ist bei der Darstellung der Strahlungsleistung in mW deutlich zu erkennen (Abb. 6-9). Die Styropor-Kugel hat durch ihre große Reflexionswirkung eine hohe Strahlungsleistung. Wird die Styropor-Kugel demgegenüber mit Bariumsulfat beschichtet, kann eine ähnlich diffuse Strahlungsleistung wie mit einer Ulbricht-Kugel erreicht werden. Es entstehen nur minimale Abweichungen.

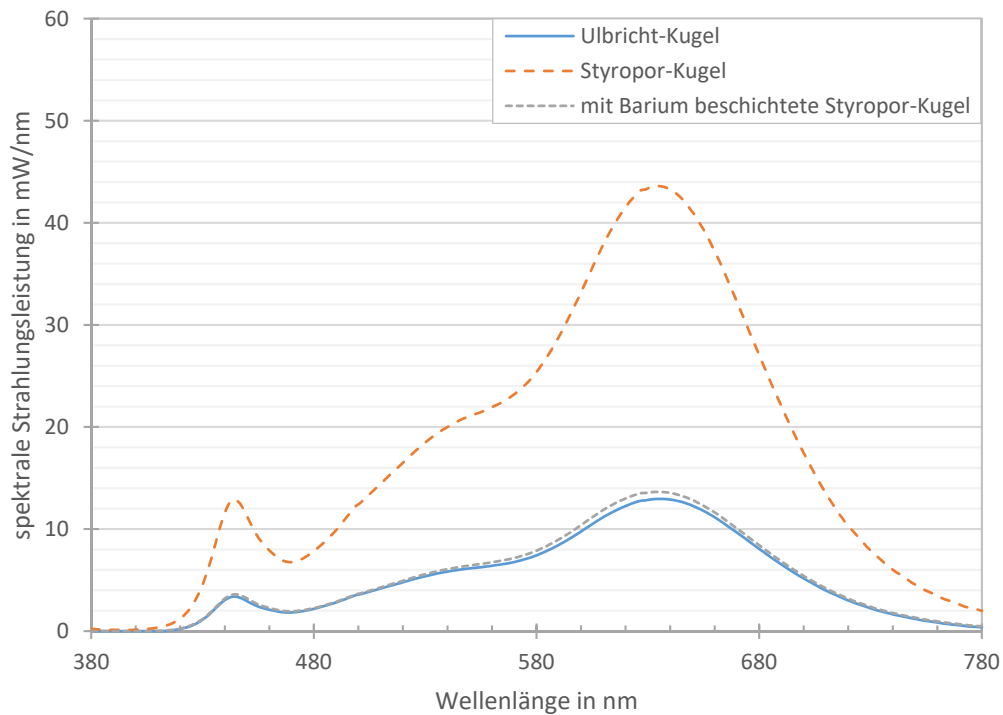


Abb. 6-9: Unterschiede der Strahlungsleistung der Beleuchtungs-Kugeln

Diese Arbeit thematisiert die optimierte Hintergrundbeleuchtung. Das Farbspektrum, welches der Betrachter sieht, wird vor dem LCD gemessen und beurteilt.

Durch das LCD wird ein Großteil der erzeugten Beleuchtungsstärke in der Nachbildung aus Styropor absorbiert. Eine Untersuchung der Transmission des LCD wurde im „Anhang D: Transmission des Hintergrundbeleuchtungsaufbaus mit LCD“ durchgeführt. Das LCD wirkt wie ein Filter für die Hintergrundbeleuchtung.

Für den Betrachter ist nur das Lichtspektrum maßgebend, welches sein Auge trifft. Deshalb werden im weiteren Verlauf alle spektralen Messungen aus der Sicht des Betrachters auf der beleuchteten Fläche durchgeführt.

Der Monitor *Benq* BL2205 hat im Lieferzustand eine Farbtemperatur von ca. 5700 K. Das Ziel besteht darin, eine Hintergrundbeleuchtung zu erzeugen, die einen reduzierten Blaulichtanteil gegenüber einer handelsüblichen Hintergrundbeleuchtung (z. B. *Benq* BL2205) aufweist. Die Farbtemperatur der Hintergrundbeleuchtung der HGBSK wird ebenfalls auf 5700 K des *Benq* BL2205 eingestellt. Für alle Messungen wird eine

Beleuchtungsstärke von 80 Lux beibehalten. Anschließend wird die elektrische Leistung der Kanäle für die blauen LEDs der Hintergrundbeleuchtung der HGBSK bestimmt und entsprechend der Vorgaben (100 %, 75 %, 50 %, 25 %, kein Blaulicht) eingestellt. Das Ergebnis mit dem LCD ist in der folgenden Übersicht (Tab. 6-2) dargestellt.

	Modus	DMX Wertebereich								Farbtemperatur [K]	CRI (Ra)	Beleuchtungsstärke [Lux]	Leistung [W]		
		Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 6	Kanal 7	Kanal 8				Gesamt	Kanal 2 (blau)	Kanal 3 (blau)
	1. Lichtfarbe weiß	0	48	49	113	239	0	0	0	5703	85,7	80,50	9,35	1,02	1,01
elektrische Leistung der blauen Kanäle reduziert auf	2. 75 %	0	31	35	101	255	0	0	0	4590	88,2	80,79	7,87	0,75	0,75
	3. 50 %	0	22	23	112	241	2	0	0	4069	89,5	80,45	7,48	0,53	0,54
	4. 25 %	0	15	15	102	239	4	0	0	3498	88,1	80,60	7,38	0,25	0,25
	5. ohne Blaulicht	0	0	0	62	255	30	14	117	2049	85,0	80,31	9,03	0	0

Tab. 6-2: Messergebnisse der LED-Leuchte der HGBSK mit aktiviertem LCD (Farbe Weiß aktiviert)

Wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, können alle Betriebsarten der LED-Leuchte eingestellt werden. Die Farbtemperatur kann wie in Abschnitt 6.1 mit einer handelsüblichen Ulbricht-Kugel übernommen und eingestellt werden. Lediglich die Beleuchtungsstärke nimmt stark ab, was dem Aufbau des LCDs geschuldet ist. Ebenso wirkt sich der Aufbau des LCDs auf den CRI aus.

Die spektrale Zusammensetzung des Lichts der verschiedenen Betriebsarten nach Tab. 6-2 ist unter Verwendung des LCDs in Abb. 6-10 visualisiert.

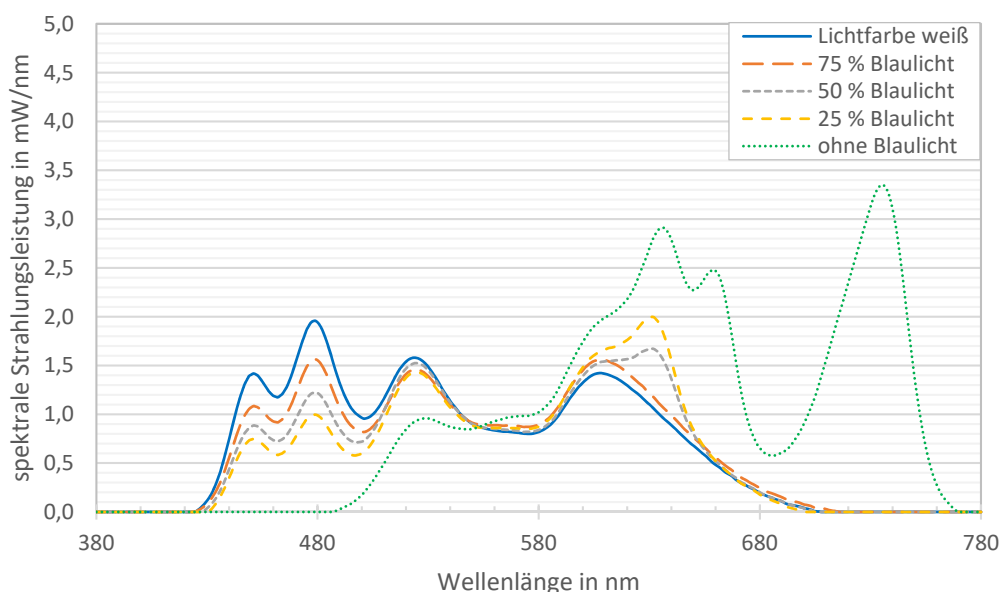


Abb. 6-10: Übersicht Lichtspektren der LED-Leuchte (gemessen mit LCD als Filter)

Die Reduzierung der elektrischen Leistung der Kanäle 2 und 3 führt zur Verringerung der Farbtemperatur. Für den Erhalt der Beleuchtungsstärke müssen andere Lichtkanäle entsprechend nachgeregt werden, wodurch die gesamte elektrische Leistung in etwa erhalten bleibt. Für die Einstellung ohne Blaulicht werden die Kanäle der roten LEDs hinzugeschaltet, wodurch eine höhere Leistungsaufnahme zustande kommt.

Wie in Abb. 6-11 zu erkennen ist, kann mit der entwickelten LED-Leuchte aus Kapitel 5 unter Berücksichtigung der ähnlichen Farbtemperatur und ähnlicher Beleuchtungsstärke (hier eines *Benq* BL2205 Monitors) eine optimierte Hintergrundbeleuchtung erzeugt werden. Der Unterschied der Strahlungsleistung der beiden Lichtquellen, in Abb. 6-11 als „Delta“ bezeichnet, zeigt im Bereich von 420 – 450 nm einen wesentlich reduzierten Blaulichtanteil (roter Peak ins Negative).

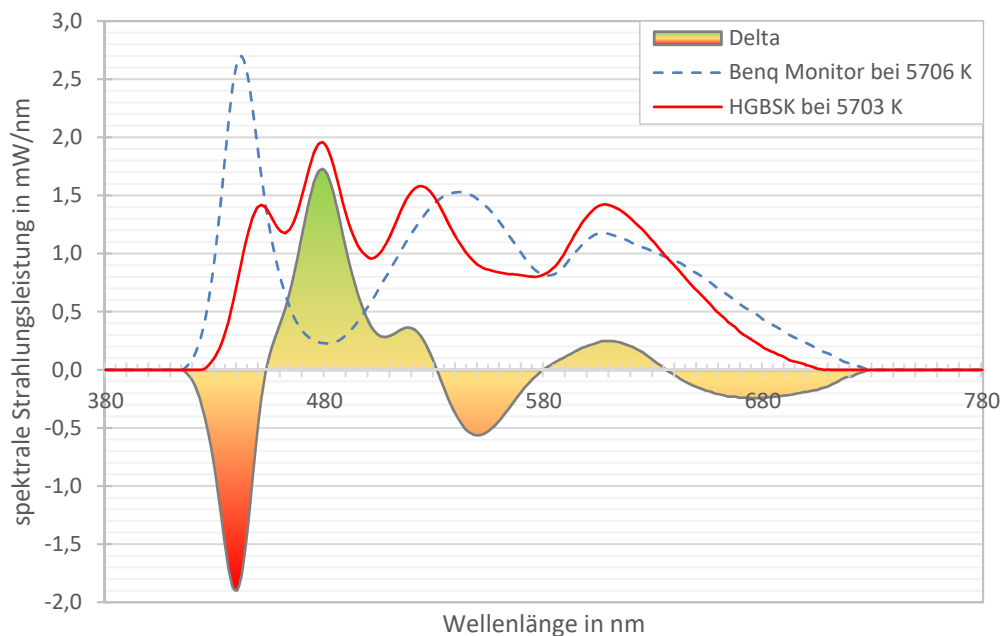


Abb. 6-11: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und der HGBSK



Eine Betrachtung des Farbwiedergabeindex ergibt ebenso einige Verbesserungen gegenüber dem Standard-Monitor (Abb. 6-12). Dabei werden alle  $R_e$ -Werte erfasst und in einem Diagramm gegenübergestellt. Für die Ansicht wird ein Balkendiagramm gewählt, sodass unmittelbar erkennbar ist, welche  $R_e$ -Werte beim Farbwiedergabeindex besser als die vom *Benq* BL2205 wiedergegeben werden. Die Lücken (z. B.  $R_3$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ , etc.) werden mit einer Hintergrundbeleuchtung mit vielen einzelnen LEDs besser ausgefüllt.

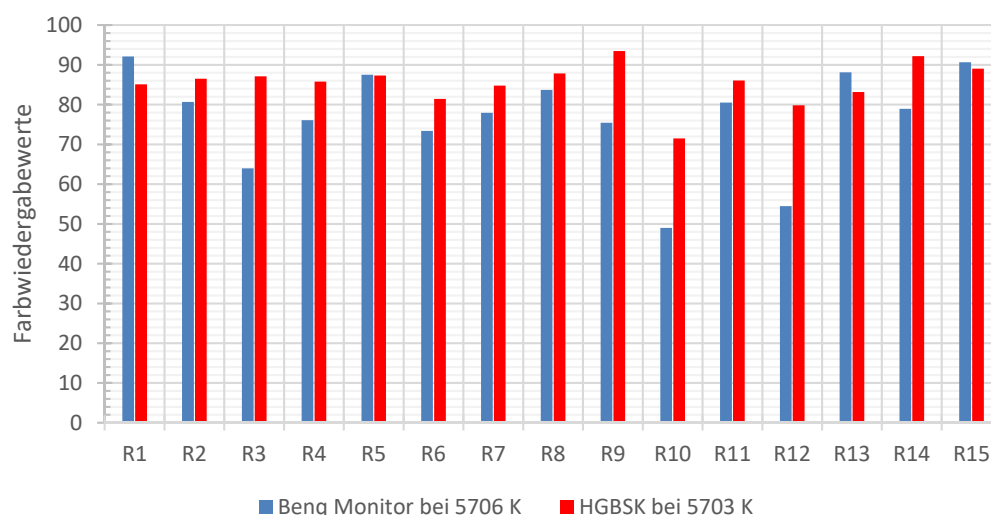


Abb. 6-12: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und der HGBSK

Ein Blick auf weitere Lichtqualitätsindizes zeigt ein ähnliches Bild. Die HGBSK kann die gewählte ähnlichste Farbtemperatur von 5703 K besser wiedergeben (Abb. 6-13).

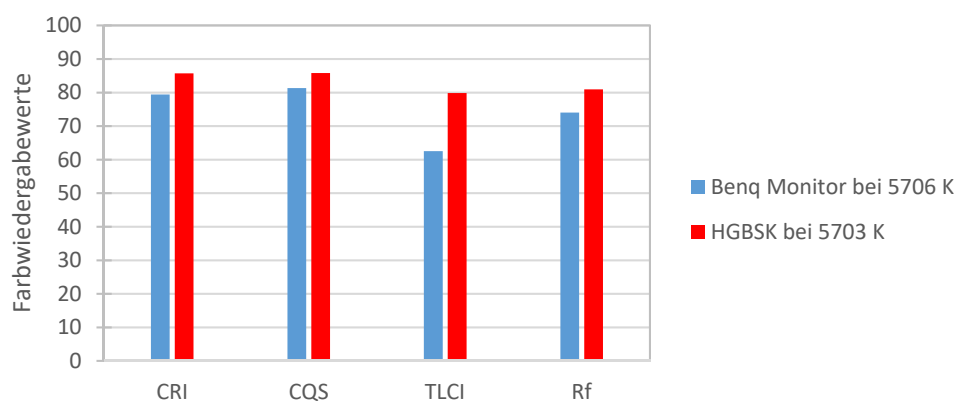


Abb. 6-13: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und der HGBSK

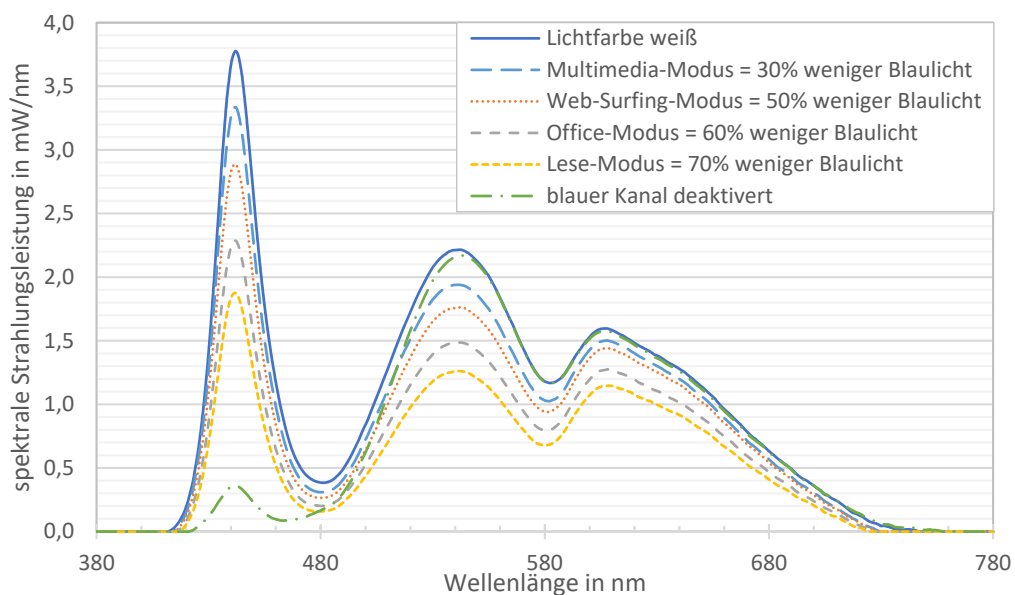
Durch die ersten Messungen (Abb. 6-13) wird deutlich, dass eine Verbesserung der Farbwiedergabewerte der Hintergrundbeleuchtung mit mehreren LEDs erreicht werden kann. Im Folgenden werden sechs verschiedene Betriebsarten einer Hintergrundbeleuchtung für den *Benq* BL2205 eingestellt und mit der HGBSK simuliert. Dabei werden die Farbtemperatur und der CRI mit dem Spektrometer MK350S gemessen.

Modus	DMX Wertebereich								HGBSK		Vergleichsmonitor (Benq BL2205)	
	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 6	Kanal 7	Kanal 8	Farbtemperatur [K]	CRI (R <sub>a</sub> )	Farbtemperatur [K]	CRI (R <sub>a</sub> )
Lichtfarbe weiß	0	63	58	114	255	0	0	0	5944	82,3	5939	78,9
30 % weniger Blau	0	52	58	100	244	0	0	0	5669	81,9	5667	80,0
50 % weniger Blau	0	47	51	94	244	0	0	0	5309	80,8	5309	80,8
60 % weniger Blau	0	41	41	93	244	0	0	0	4985	81,3	4985	81,3
70 % weniger Blau	0	36	35	89	252	0	0	0	4705	85,9	4704	82,1
Blaukanal „aus“ LCD	0	0	5	150	255	4	0	0	3955	72,8	3955	72,7

Tab. 6-3: Simulation der Blaulicht-Betriebsarten des *Benq* BL2205 durch die HGBSK

Mit der HGBSK kann eine ähnliche Farbtemperatur wie mit dem Monitor *Benq* BL2205 erzeugt werden (Tab. 6-3). Für eine noch bessere Farbtemperatur-Übereinstimmung können die LCDs kalibriert werden (siehe „Anhang E: Kalibrierung der LCD“). Dadurch ist es möglich, mit der konstruierten LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum die identischen Rahmenbedingungen für einen Monitor zu schaffen.

*Benq* wirbt mit reduziertem Blaulichtanteil im Lichtspektrum. Stellt man diese Modi mit reduziertem Blaulichtanteil gegenüber (Abb. 6-14), erkennt man, dass lediglich die Strahlungsleistung reduziert wird. Zusätzlich wird das LCD in der Art angesteuert, dass die Farbtemperatur wärmer wird. Real wird also nur die Beleuchtungsstärke, nicht aber der Blaulichtanteil verringert.

Abb. 6-14: „Low Blue Light Modus“ des Monitors *Benq* BL2205

Der spektrale Verlauf (Abb. 6-15) der konstruierten LED-Leuchte hat gegenüber dem *Benq* BL2205 einen geringeren Blaulichtanteil.

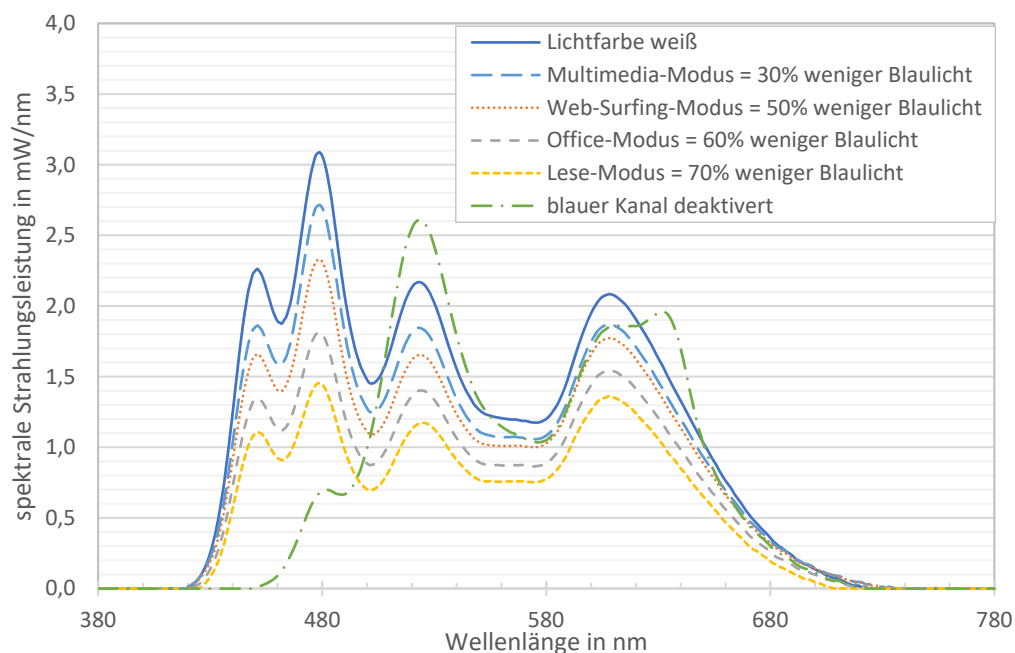


Abb. 6-15: Lichtspektren derselben Betriebsarten der HGBSK und bei selber Helligkeit des *Benq* BL2205 Monitors

Für einen besseren Vergleich wird der „Lese-Modus“ (Reduzierung des Blaulichtanteils von 70 %, Angabe von *Benq*) vom *Benq* BL2205 mit der HGBSK verglichen. Mit der HGBSK kann eine effizientere Blaulichtminimierung im Bereich von 420 – 450 nm erreicht werden (roter Peak, Abb. 6-16). Im Bereich ca. 450 – 500 nm liegt die Strahlungsleistung etwas höher.

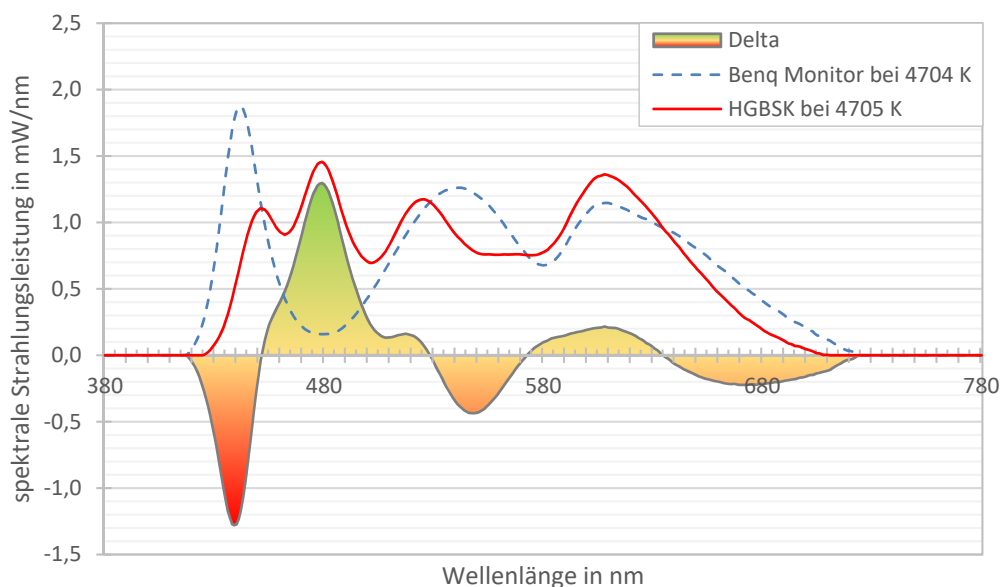


Abb. 6-16: Vergleich der Lichtspektren des *Benq* Monitors (Betriebsart „Lese-Modus“) und der HGBSK

Des Weiteren wird ein höherer CRI erreicht (Abb. 6-17). In einigen Bereichen liegen die einzelnen Farbwiedergabeindizes über denen des *Benq* Monitors R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, etc. Somit können Farben auf der beleuchteten Oberfläche (LCD) besser wiedergegeben werden. Eine optimierte Hintergrundbeleuchtung mit real weniger Blaulicht ist damit möglich.

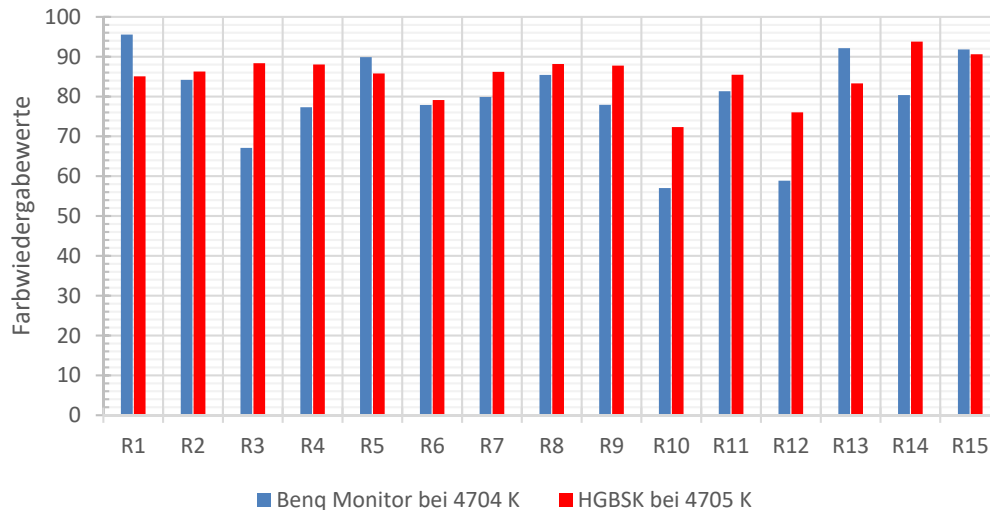


Abb. 6-17: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors (Betriebsart „Lese-Modus“) und der HGBSK

Die gemessenen Unterschiede der Lichtqualitätsindizes sind in Abb. 6-18 dargestellt:

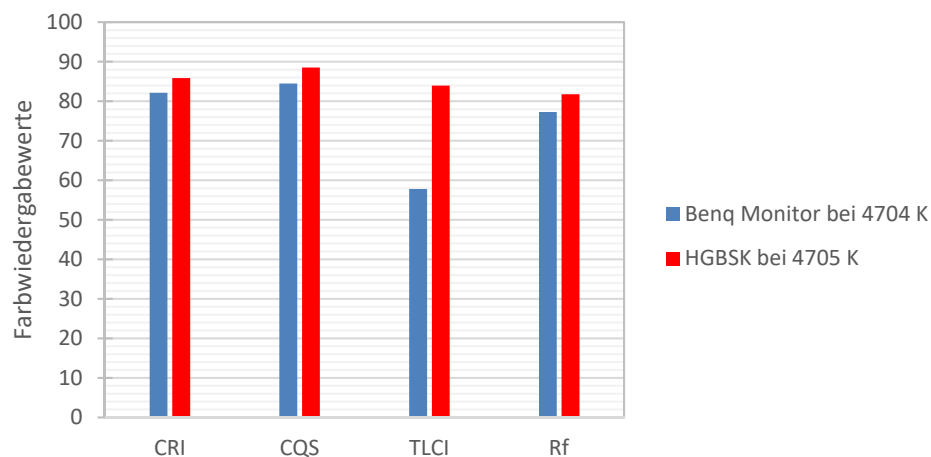


Abb. 6-18: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors (Betriebsart „Lese-Modus“) und der HGBSK

Mit der HGBSK ist in einigen Bereichen eine deutliche Verbesserung (z. B. Lichtqualitätsindex TLCI) möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass eine angepasste Steuerung der Hintergrundbeleuchtung mit gleichzeitiger Erhöhung des CRI durchgeführt werden kann. Eine verbesserte Farbwiedergabe führt zu einer besseren Farbwahrnehmung für den Menschen. Die detaillierte Gegenüberstellung der einzelnen Betriebsarten ist in „Anhang F: Detailliere Ergebnisse der Versuche“ aufgelistet.

Im direkten Vergleich eines CCFL-Monitors *iiyama ProLite B2409HDS* mit dem *Benq* Monitor BL2205 ist deutlich der erhöhte Blauanteil der LED-Hintergrundbeleuchtung des *Benq* zu sehen (Abb. 6-19). Bei der CCFL sind die Wellenlängen bei 525 nm und 610 nm stark erhöht.

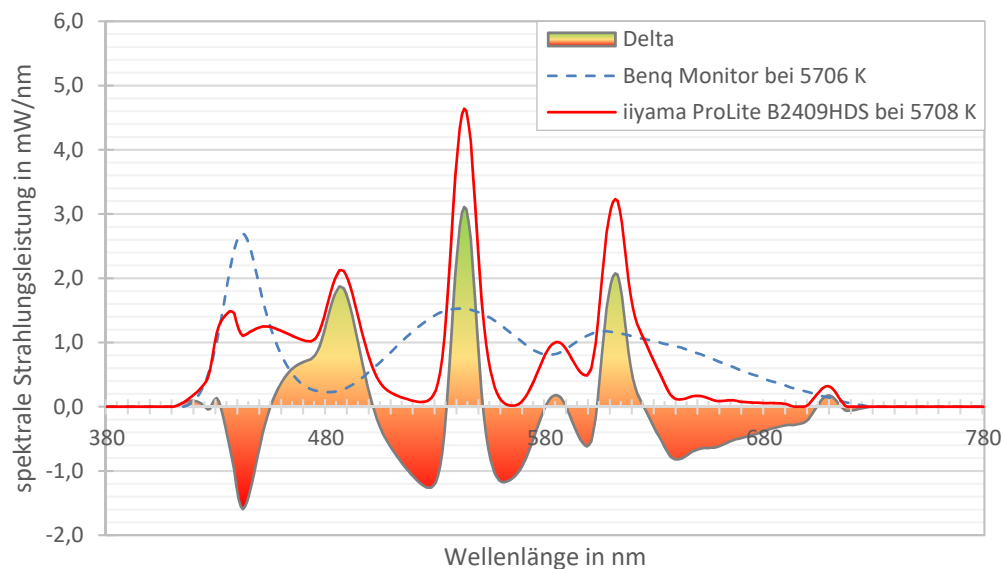


Abb. 6-19: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors (Farbtemperatur im Lieferzustand) und dem iiyama ProLite

Die HGBSK zeigt im Vergleich mit einem *iiyama ProLite B2409HDS* Monitor, dass der Blauanteil im Wellenlängenbereich von 410 nm – 445 nm bei ähnlichster Beleuchtungsstärke, minimiert werden kann (Abb. 6-20). Die Spektrallinien für eine CCFL bei ca. 525 nm und 610 nm werden ebenfalls reduziert.

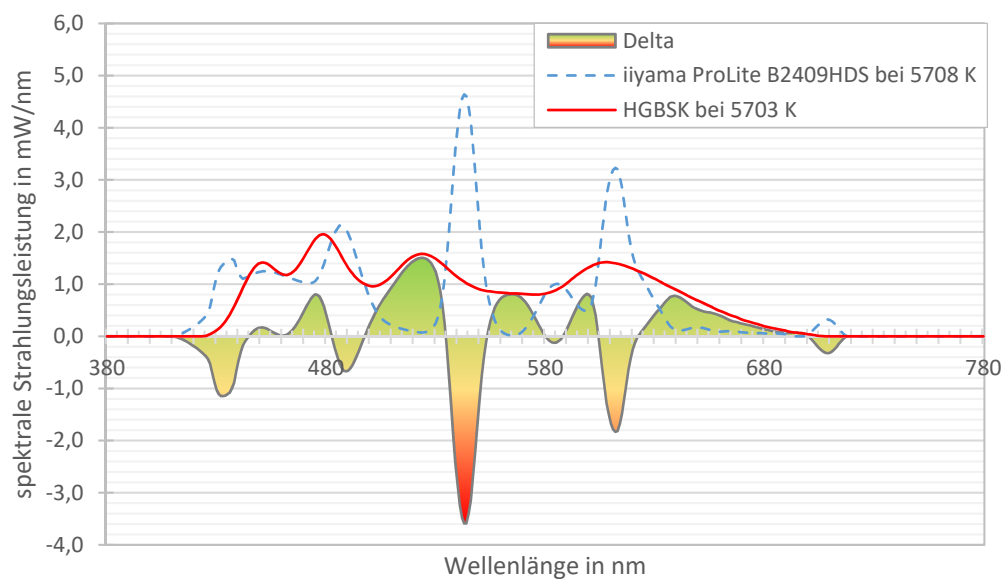


Abb. 6-20: Vergleich der Lichtspektren des iiyama ProLite (Farbtemperatur 5708 K) und der HGBSK

Eine subjektive Beurteilung der Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum kann z. B. mit einem *ColorChecker* durchgeführt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das *Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart* (Abb. 6-21) mit 24 Testfarben für die Beurteilung der Farbreproduktion der Monitore verwendet. Das *Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart* wird auf dem LCD der HGBSK sowie dem Referenz-Monitor (*Benq BL2205*) angezeigt. Beide Monitore sind mit derselben Grafikkarte eines PCs verbunden. Dadurch ist gewährleistet, dass beide LCDs dasselbe Bildsignal erhalten.

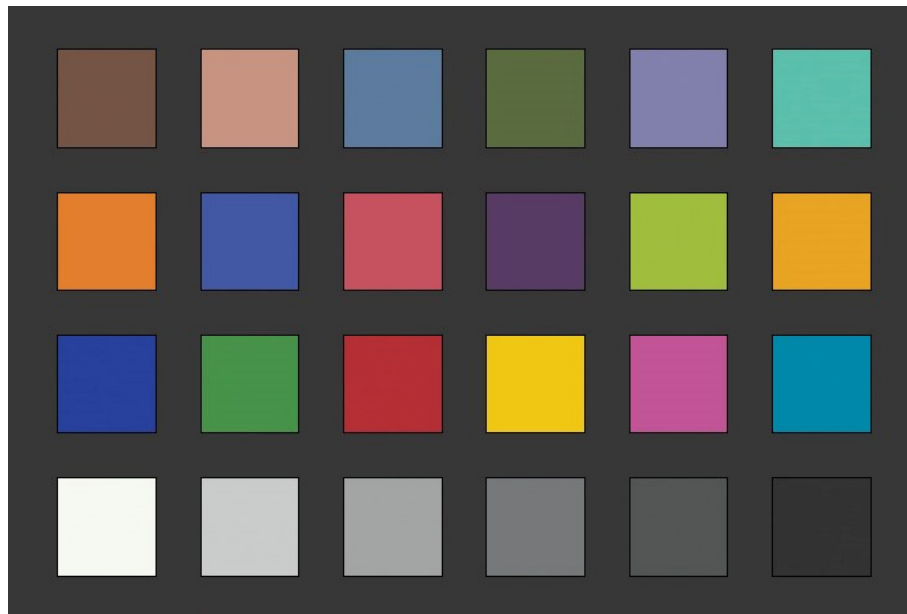


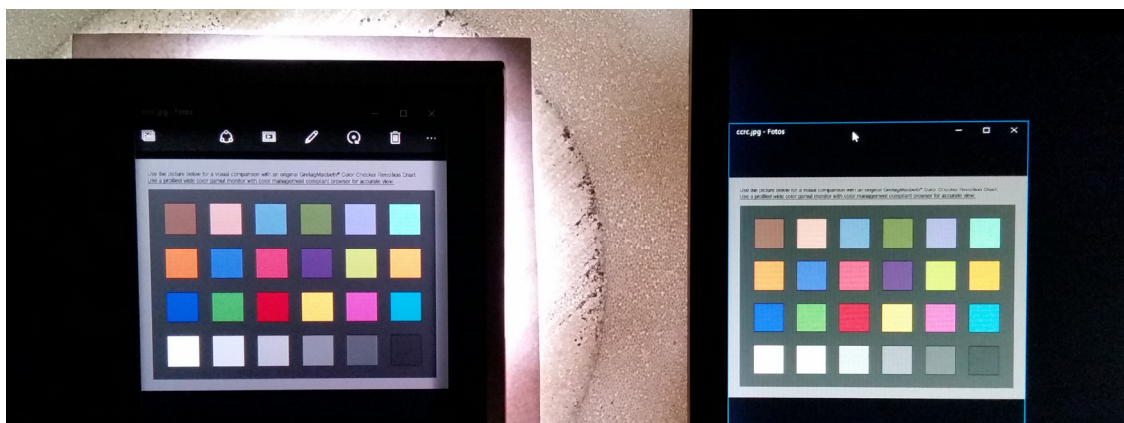
Abb. 6-21: *Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart*

Diese von McCamy, Marcus, und Davidson im Jahre 1976 entwickelte *Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart* mit 24 Testfarben (Tab. 6-4) besteht aus vier mal sechs Kacheln (Abb. 6-21), die Farben für die verschiedenen Anwendungsbereiche enthalten. Die Farben sind durch die Koordinaten  $(x, y)$  im CIE-Diagramm von 1931 und durch einen charakteristischen Reflexionsfaktor  $\Gamma$  definiert. In vielen Bereichen, wie z. B. Fotografie, Film, Druck und Fernsehen, wird die Farbtabelle zu analytischen Zwecken eingesetzt.

Index	Beschreibung	CIE 1931-Werte			sRGB-Werte
		x	y	Reflexionsfaktor $\Gamma$ [%]	
1	Dark skin	0,4002	0,3504	10,05	#735244
2	Light skin	0,3773	0,3446	35,82	#c29682
3	Blue sky	0,2470	0,2514	19,33	#627a9d
4	Foliage	0,3372	0,4220	13,29	#576c43
5	Blue flower	0,2651	0,2400	24,27	#8580b1
6	Bluish green	0,2608	0,3430	43,06	#67bdaa
7	Orange	0,5060	0,4070	30,05	#d67e2c
8	Purplish blue	0,2110	0,1750	12,00	#505ba6
9	Moderate red	0,4533	0,3058	19,77	#c15a63
10	Purple	0,2845	0,2020	6,56	#5e3c6c
11	Yellow green	0,3800	0,4887	44,29	#9dbc40
12	Orange yellow	0,4729	0,4375	43,06	#e0a32e
13	Blue	0,1866	0,1285	6,11	#383d96
14	Green	0,3046	0,4782	23,39	#469449
15	Red	0,5385	0,3129	12,00	#af363c
16	Yellow	0,4480	0,4703	59,10	#e7c71f
17	Magenta	0,3635	0,2325	19,77	#bb5695
18	Cyan	0,1958	0,2519	19,77	#0885a1
19	White	0,3101	0,3163	90,01	#f3f3f2
20	Neutral 8	0,3101	0,3163	59,10	#c8c8c8
21	Neutral 6.5	0,3101	0,3163	36,20	#a0a0a0
22	Neutral 5	0,3101	0,3163	19,77	#7a7a79
23	Neutral 3.5	0,3101	0,3163	9,00	#555555
24	Black	0,3101	0,3163	3,13	#343434

Tab. 6-4: Color-Rendition Chart (McCamy, Marcus, &amp; Davidson, 1976)

Der erste subjektiv gewonnene Eindruck zeigt, dass die Farben bei der HGBSK (links) eine deutlich höhere Sättigung besitzen (Abb. 6-22) als die etwas blasseren Farben am *Benq* BL2205 (rechts).

Abb. 6-22: Vergleich *Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart*: links Nachbau aus Styropor, rechts *Benq* BL2205

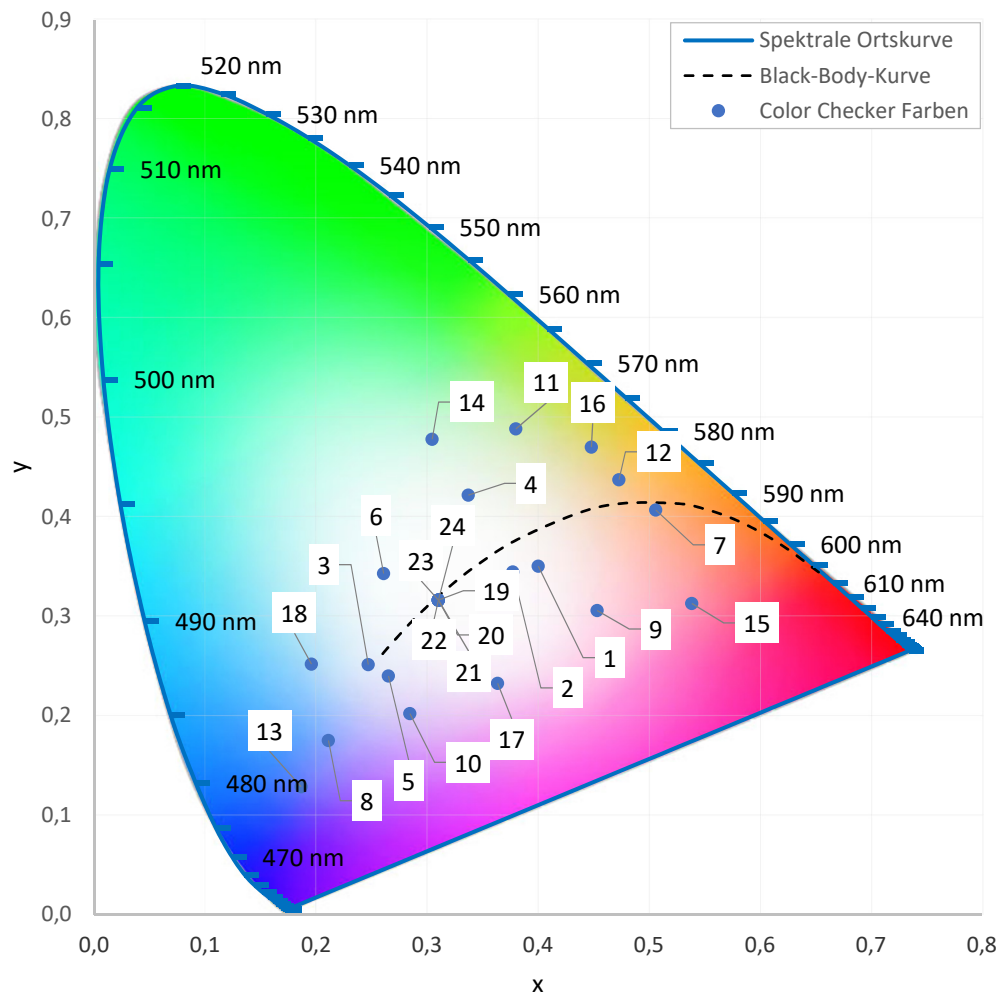


Abb. 6-23: Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart Farben im CIE 1931

In Abb. 6-23 sind die Farben des *Gretag-Macbeth ColorChecker Referenzchart* eingezeichnet.

Die 24 Testfarben sind über einen großen Bereich der Black-Body-Kurve im CIE-Diagramm von 1931 verteilt. Somit kann mit dem *ColorChecker* ein objektiver Eindruck gewonnen werden.



### 6.2.1 *f.lux* zur Reduzierung des Blaulichtanteils im Vergleich zur HGBSK

Im ersten Vergleich wird die kostenlose „blaulichtreduzierende“ Software *f.lux* untersucht. Diese kann auf jedem Computer mit dem Betriebssystem *Microsoft Windows* installiert werden. Es wird auf dem Monitor *Benq* BL2205 mit der Software *f.lux* eine Abenddämmerung aktiviert. Mit der Steuerung des LCDs durch *f.lux* werden die schmalbandigen Farbfilter (vgl. Abb. 1-17) derart gesteuert, dass die Strahlungsleistung abnimmt (vgl. Abb. 1-30). Das kaltweiße Licht (großer Blaulichtanteil) der Hintergrundbeleuchtung bleibt dabei aktiviert. Farbtemperatur, Beleuchtungsstärke und das Farbspektrum werden gemessen. Anschließend wird die HGBSK mit der Software QLC + auf die Farbtemperatur des mit *f.lux* gesteuerten Monitors eingestellt. Jetzt zeigen beide LCDs dieselbe Farbtemperatur der Hintergrundbeleuchtung bei gleicher Beleuchtungsstärke. Die Lichtspektren der Ausgangssituation *Benq* Monitor, *Benq* Monitor mit *f.lux* und die HGBSK werden in einem Diagramm dargestellt (Abb. 6-24).

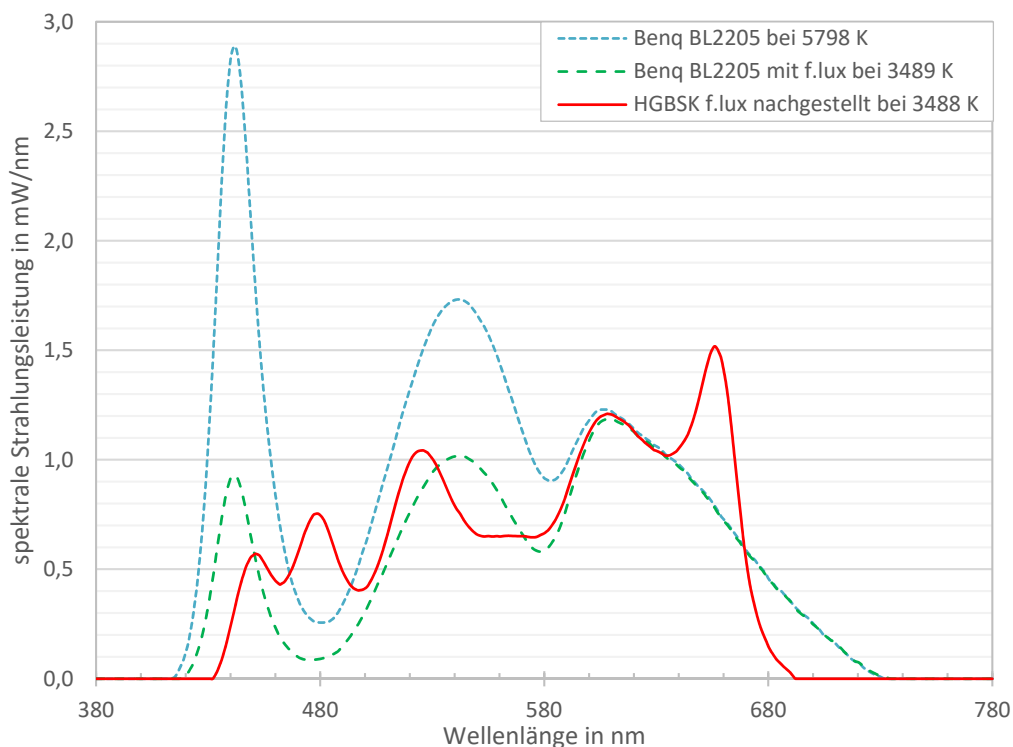


Abb. 6-24: Vergleich der Lichtspektren von Benq Monitor, Benq Monitor mit *f.lux* und HGBSK

Es ist zu erkennen, dass das Lichtspektrum der Ausgangssituation des *Benq* Monitors durch die Software *f.lux* verändert worden ist. Die Farbtemperatur hat sich von 5798 K auf 3489 K in eine wärmere Farbtemperatur verändert. Außerdem kann der Blaulichtanteil bei ähnlichster Farbtemperatur mit der HGBSK noch weiter reduziert werden (rote Kurve im Diagramm).

Zur Verdeutlichung der Unterschiede der Software *f.lux* zur Ausgangssituation und zur HGBSK zur Ausgangssituation sind die Lichtspektren und ihr Delta in den Abb. 6-25 und Abb. 6-26 dargestellt. Durch den roten Peak wird deutlich, dass der Blaulichtanteil auf ein Drittel und der Grünlichtanteil auf 60 % reduziert werden.

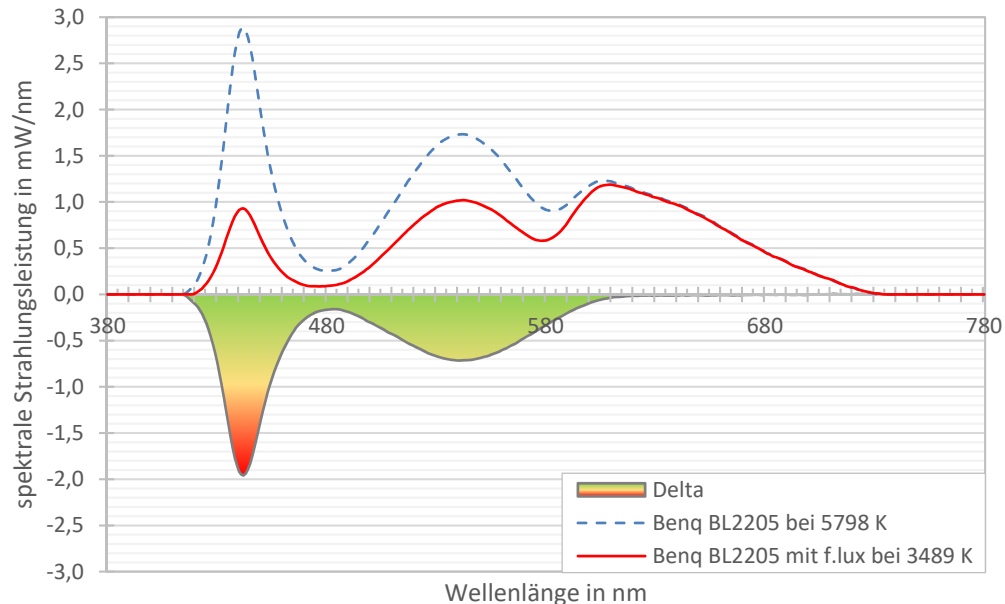


Abb. 6-25: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und des Benq Monitors mit f.lux

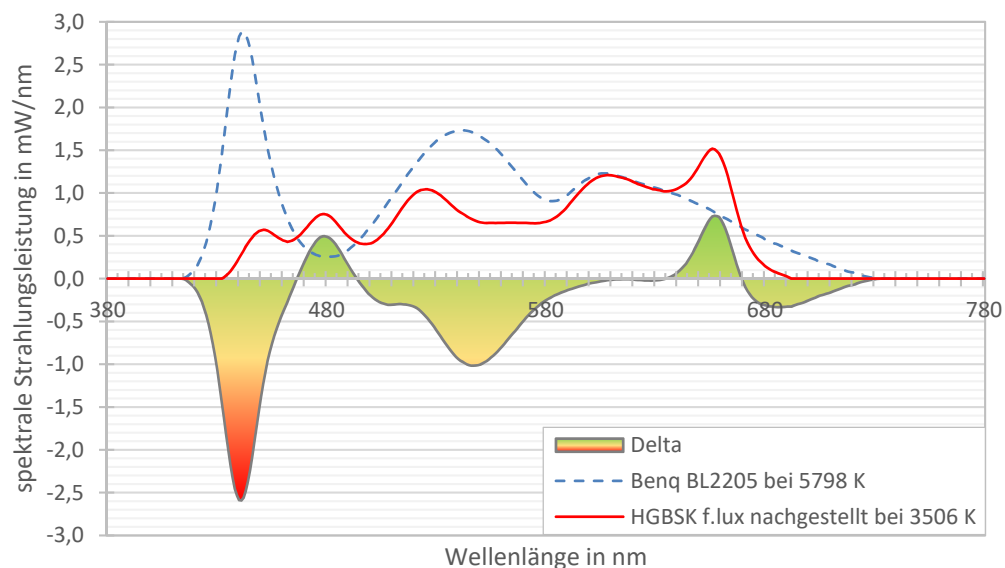


Abb. 6-26: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK

Wie aus den beiden Diagrammen erkennbar ist, unterscheidet sich das Lichtspektrum der HGBSK von dem des Monitors mit Softwaresteuerung. Die HGBSK kann mit weniger Blaulicht bei ähnlichster Farbtemperatur das LCD beleuchten. Im Bereich um 480 nm und bei ca. 650 nm wird dafür die Strahlungsleistung verdoppelt.

Die Farbwiedergabe (CRI) der HGBSK ist bei fast allen Indizes (R1 bis R15) gesteigert (Abb. 6-27).

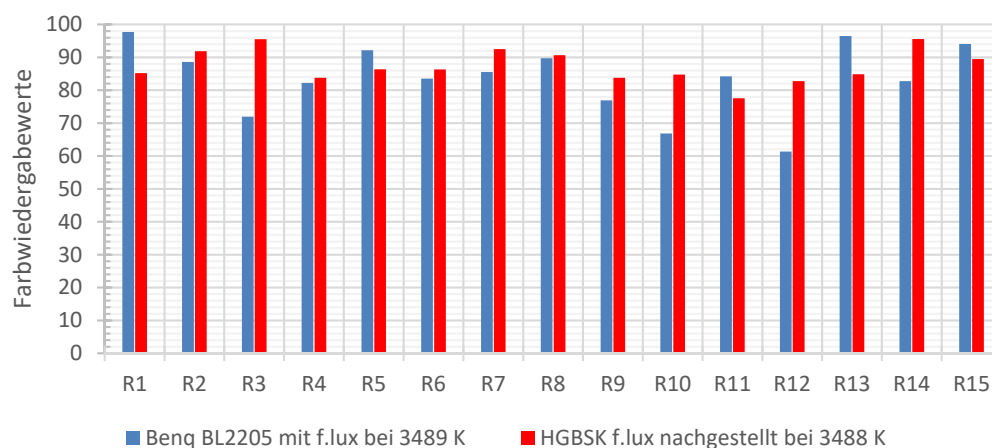


Abb. 6-27: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors mit f.lux und der HGBSK

Der CRI ist nur eine Bewertungsmöglichkeit. Daher werden im Folgenden einige weitere Farbbewertungssysteme gegenübergestellt (Abb. 6-28). Erkennbar ist, dass bei diesen Bewertungssystemen mit der HGBSK eine Verbesserung der Farbwiedergabewerte gegenüber der Software *f.lux* gegeben ist.

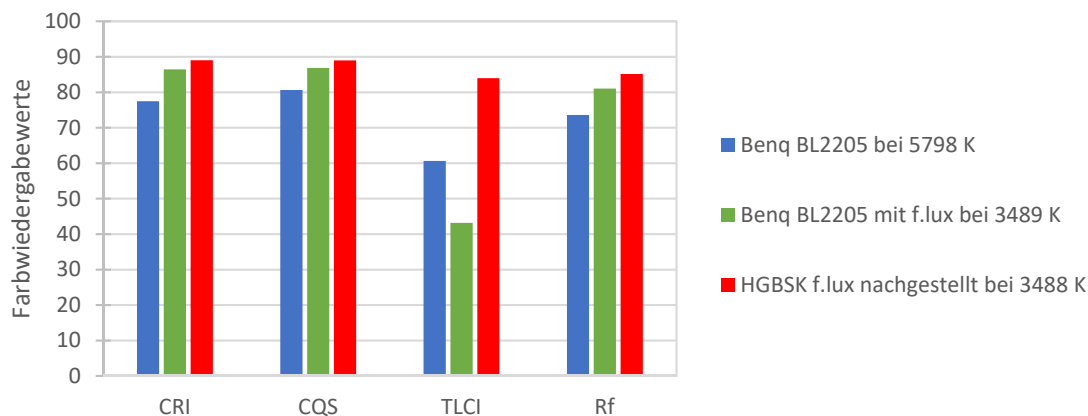


Abb. 6-28: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes von Benq Monitor, Benq Monitor mit f.lux und HGBSK

Die Verbesserung gegenüber der Software *f.lux* wird im Folgenden in Prozent bestimmt, um einen Überblick über Möglichkeit der HGBSK zu bekommen (Tab. 6-5).

Lichtqualitäts-indizes	Farbwiedergabewerte <i>Benq BL2205 mit f.lux</i>	Farbwiedergabe- werte HGBSK	Verbesserung mit der HGBSK in %
<b>CRI</b>	86,44	89,03	2,99
<b>CQS</b>	86,87	88,99	2,44
<b>TLCI</b>	43,16	83,97	94,54
<b>Rf</b>	74,46	80,85	8,58

Tab. 6-5: Übersicht Verbesserung durch die HGBSK

### 6.2.2 Optischer Filter (*ZEISS BlueProtect*) zur Reduzierung des Blaulichtanteils im Vergleich zur HGBSK

Dieser Vergleich zeigt die Auswirkung einer Beschichtung auf Brillengläsern, *ZEISS BlueProtect*, in Bezug auf den Blaulichtanteil (Abb. 6-29). Hierzu wird derselbe Monitor mit den beschichteten Brillengläsern von *ZEISS* bewertet. Der Hintergrundbeleuchtungs-Aufbau mit LCD und *ZEISS BlueProtect* ist in Abb. 6-30 dargestellt. Der optische Filter (*ZEISS BlueProtect*) ist zwischen LCD und Messgerät angeordnet.



Abb. 6-29: *ZEISS BlueProtect* Beschichtung auf Brillengläsern

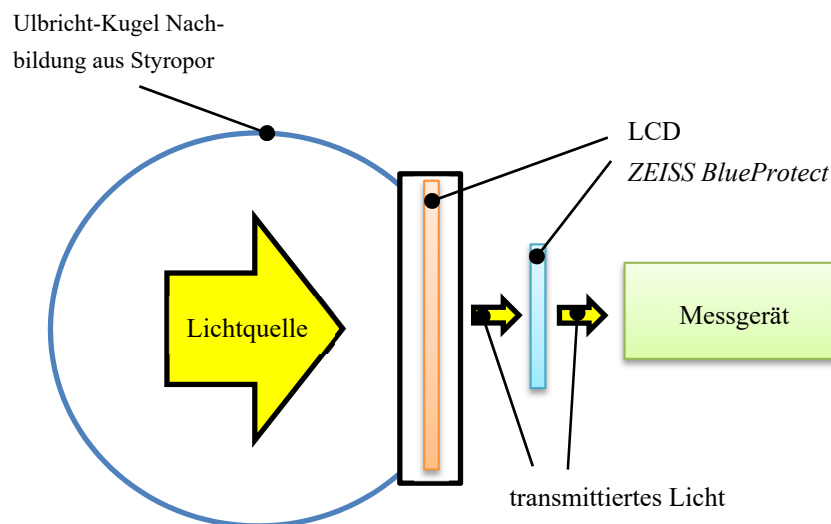


Abb. 6-30: Hintergrundbeleuchtungs-Aufbau mit LCD und *ZEISS BlueProtect*

Die Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur von 5619 K werden mit der HGBSK nachgestellt und das Lichtspektrum gemessen. In Abb. 6-31 ist zu erkennen, dass die Brillengläser mit der *ZEISS BlueProtect* Beschichtung das gesamte Lichtspektrum und damit auch den großen Blaulichtpeak bei 440 nm nur geringfügig verringern. Das Lichtspektrum der HGBSK hat einen anderen Verlauf bei ähnlichster Farbtemperatur von 5618 K und kann den Blaulichtanteil in weit höheren Maße reduzieren.

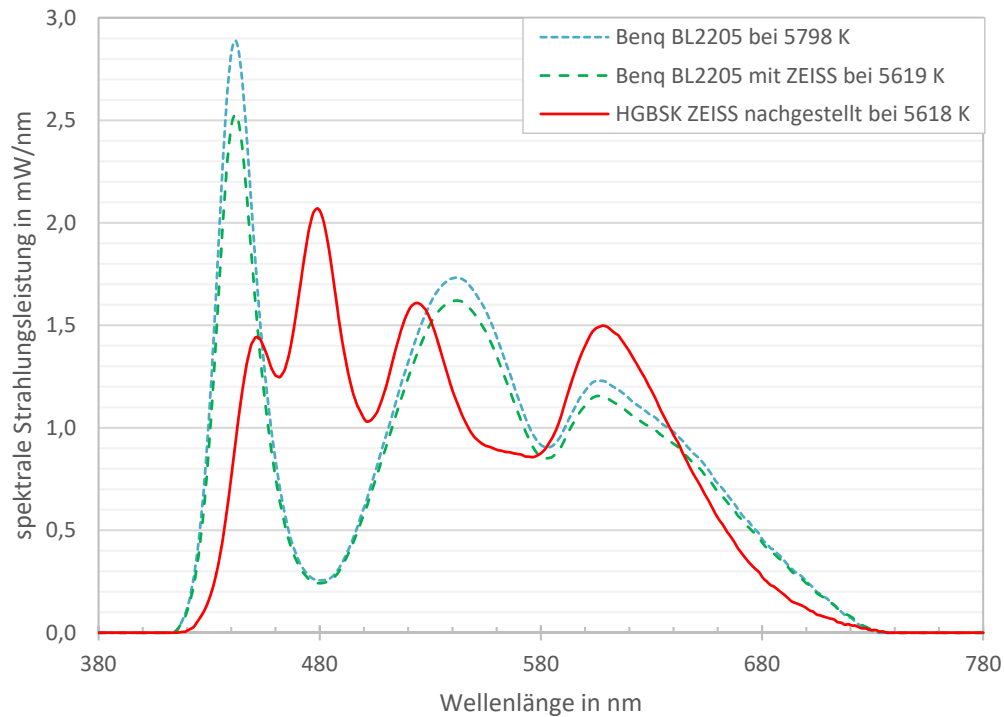


Abb. 6-31: Vergleich der Lichtspektren von Benq Monitor, Benq Monitor mit ZEISS BlueProtect Gläsern und HGBSK (ZEISS simuliert)

Eine detaillierte Übersicht des Lichtspektrums bei Verwendung der *ZEISS BlueProtect*-Gläser gegenüber dem Lichtspektrum des *Benq* Monitors verdeutlicht, dass nur wenig Blaulicht herausgefiltert werden kann (roter Peak nach unten, Abb. 6-32).

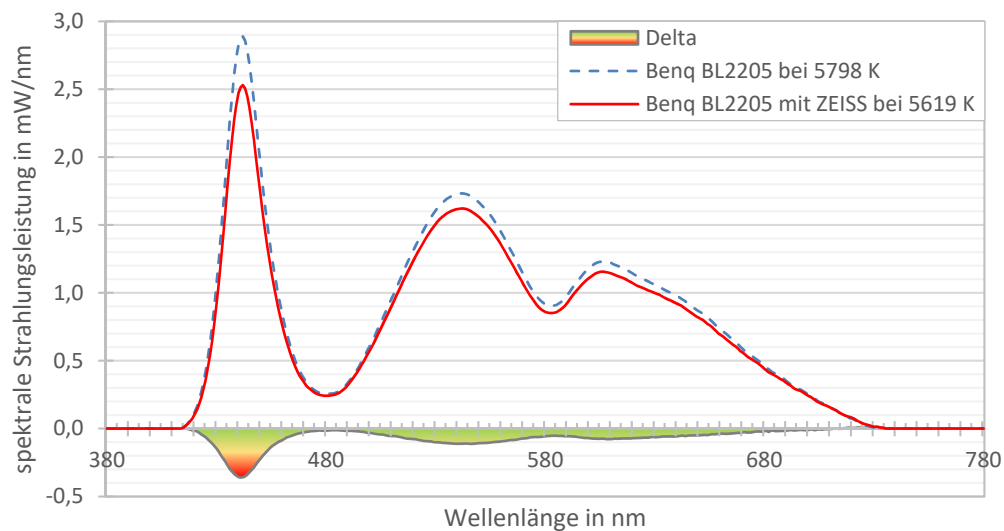


Abb. 6-32: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und des Benq Monitors mit ZEISS Blue-Protect Gläsern

Bei der Nachstellung der ähnlichsten Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke mit der HGBSK wird deutlich, dass mit der LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum ein weitaus größerer Teil an Blaulicht eliminiert werden kann als bei der Betrachtung des *Benq* Monitors mit den Brillengläsern von *ZEISS* (Abb. 6-33). Im Bereich um 480 nm wird dafür die Strahlungsleistung versechsfacht und bei ca. 650 nm um 25 % erhöht.

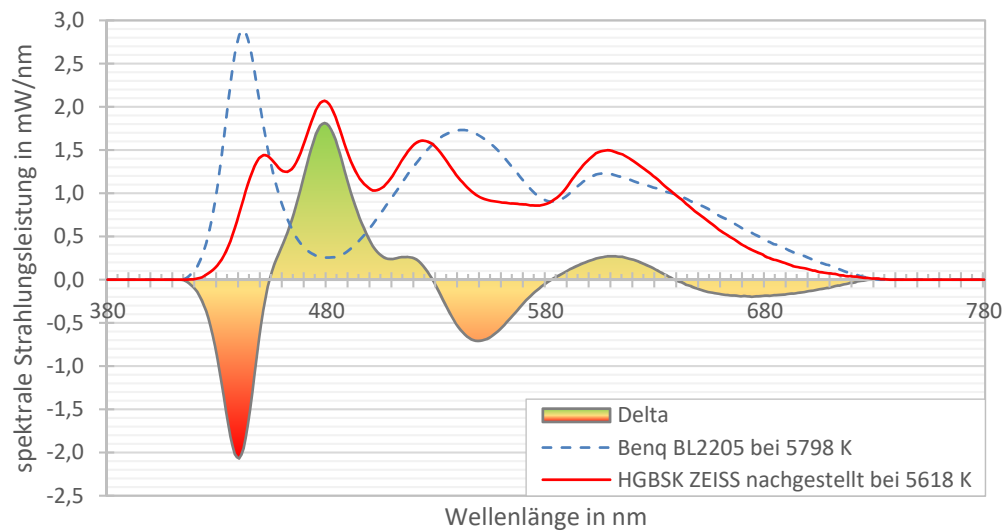


Abb. 6-33: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK (*ZEISS* simuliert)

Der Farbwiedergabeindex der HGBSK steigt gegenüber dem Farbwiedergabeindex der Brillengläser mit der *ZEISS BlueProtect* Beschichtung (Abb. 6-34).

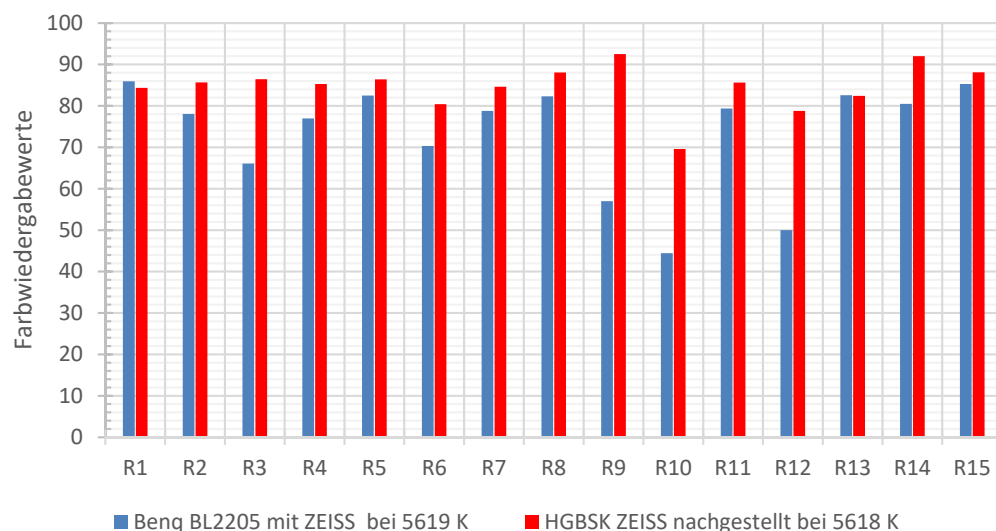


Abb. 6-34: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors mit *ZEISS Blue-Protect* Gläsern und der HGBSK (*ZEISS* simuliert)

Die Betrachtung weiterer Lichtqualitätsindizes zeigt ebenfalls eine Steigerung der Farbwiedergabewerte der HGBSK (Abb. 6-35).

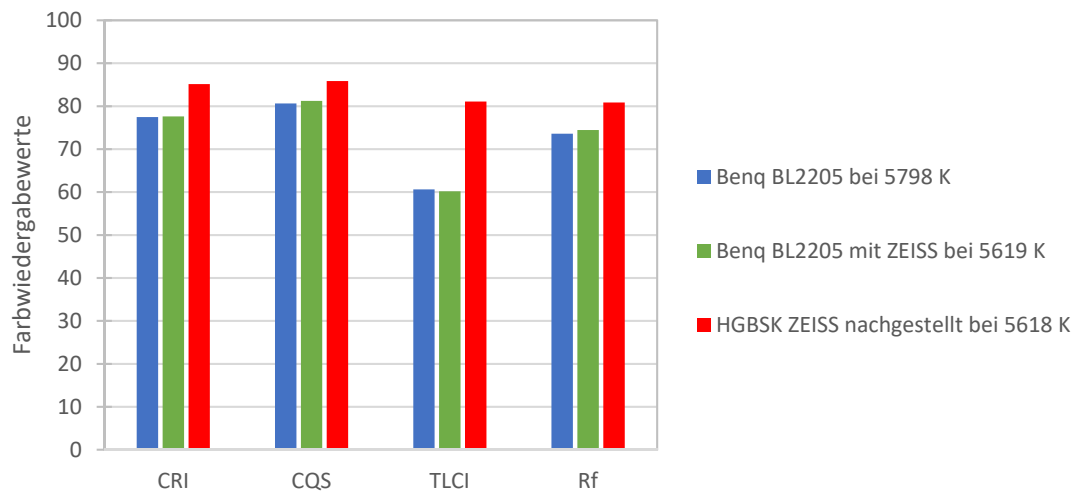


Abb. 6-35: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes von Benq Monitor, Benq Monitor mit ZEISS Blue-Protect Gläsern und HGBSK (ZEISS simuliert)

Die Verbesserungen in diesem Bereich sind im Folgenden aufgelistet (Tab. 6-6).

Lichtqualitätsindizes	Farbwiedergabewerte <i>Benq BL2205 mit ZEISS</i>	Farbwiedergabewerte HGBSK	Verbesserung mit der HGBSK in %
<b>CRI</b>	77,62	85,15	9,70
<b>CQS</b>	81,23	85,86	5,71
<b>TLCI</b>	60,17	81,07	34,74
<b>Rf</b>	74,46	80,85	8,58

Tab. 6-6: Übersicht Verbesserung durch die HGBSK

### 6.2.3 Optischer Filter (Bildschirmbrille) zur Reduzierung des Blaulichtanteils im Vergleich zur HGBSK

Im dritten Vergleich wird als eine weitere Hardware-Lösung die *PRiSMA bluelightprotect Bildschirmbrille FREiBURG - AMBER PRO* (Abb. 6-36) des Herstellers *Innovative Eyewear* untersucht. Der Versuchsaufbau ist wie in Abb. 6-30 gestaltet, anstelle der *ZEISS BlueProtect* wird die Bildschirmbrille platziert. Diese Bildschirmbrille bietet laut Herstellerangaben einen Blaulichtschutz von ca. 99 % im Bereich von 380-500 nm.



Abb. 6-36: *PRiSMA bluelightprotect Bildschirmbrille FREiBURG - AMBER PRO*

Die drei Farbspektren des *Benq* Monitors, das transmittierte Lichtspektrum der Bildschirmbrille und das nachgestellte Lichtspektrum der HGBSK sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 6-37).

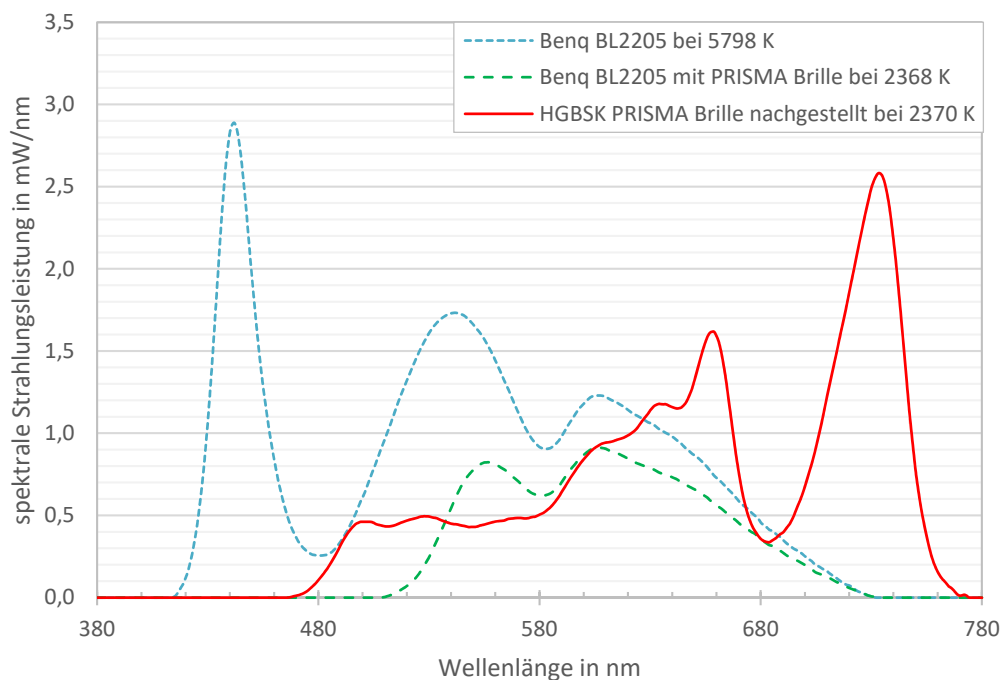


Abb. 6-37: Vergleich der Lichtspektren von Benq Monitor, Benq Monitor mit *PRiSMA bluelightprotect* und HGBSK (*PRiSMA* simuliert)



Der Blaulichtschutz der PRISMA Brille ist deutlich zu erkennen (Abb. 6-37). Erst ab ca. 500 nm lässt die Bildschirmbrille das Lichtspektrum passieren und dämpft weiter noch den restlichen Bereich bis ca. 700 nm. Die HGBSK ist auf dieselbe Farbtemperatur eingestellt. Die blauen Lichtkanäle sind deaktiviert.

Zur Beurteilung des Blaulichtanteils sind im Folgenden die einzelnen Lichtspektren gegenübergestellt. Wie in Abb. 6-38 erkennbar ist, wird das Blaulicht vollständig herausgefiltert (roter Peak nach unten).

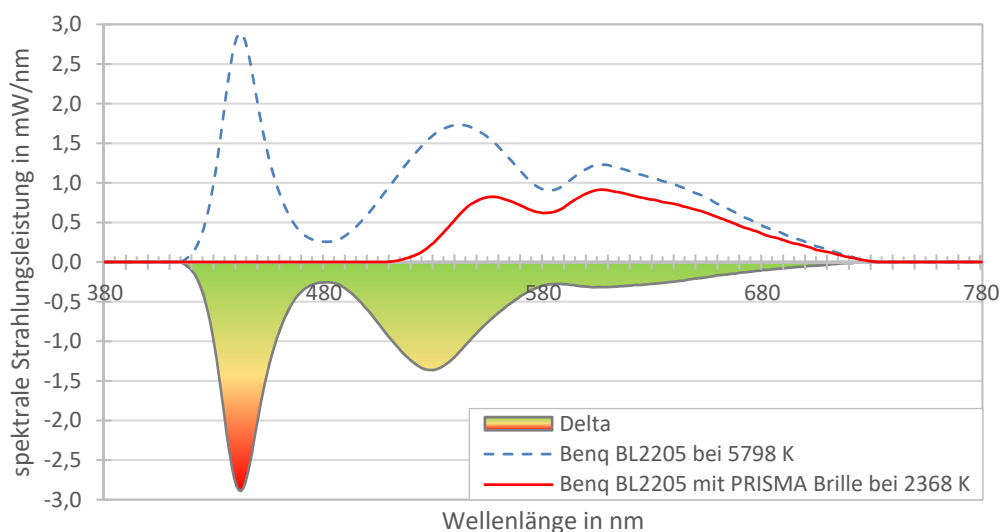


Abb. 6-38: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und des Benq Monitor mit *PRiSMA bluelightprotect*

Bei der HGBSK wird der komplette Blaulichtanteil durch gezielte Steuerung der blauen LEDs minimiert und der weitere spektrale Verlauf ca. 490 - 630 nm gedämpft (Abb. 6-39). Im Bereich von ca. 630 - 780 nm kommt hingegen ein Teil rotes Licht dazu, was in Anbetracht im Vergleich mit z. B. einer Halogenleuchte unerheblich ist. Diese gibt noch deutlich mehr Strahlungsleistung in diesem Bereich ab (vgl. Abb. 2-1).

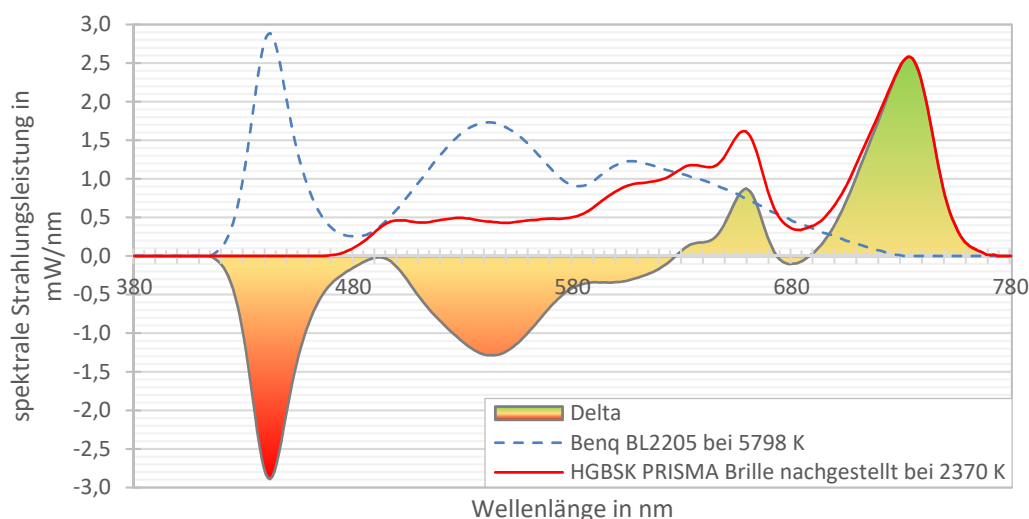


Abb. 6-39: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK (*PRiSMA* simuliert)

Der Unterschied der beiden Lichtspektren vom *Benq* Monitor und der Bildschirmbrille ist im folgenden Diagramm (Abb. 6-40) dargestellt:

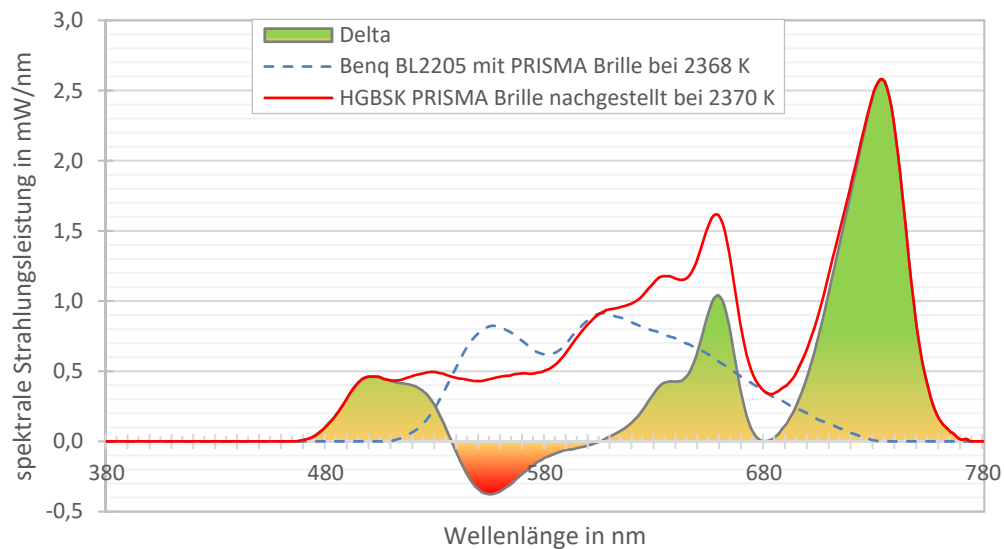


Abb. 6-40: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors mit *PRiSMA bluelightprotect* und der HGBSK (*PRiSMA* simuliert)

Die Farbwiedergabeindizes sind bei der HGBSK höher als bei der Bildschirmbrille, was dem veränderten Farbspektrum zuzuschreiben ist (Abb. 6-41). Aufgrund der historischen Entwicklung und der Erweiterung der Farbindizes von 8 auf 15 ergeben sich nach den vorgegebenen mathematischen Berechnungen (ASSIST, 2010) zum Teil negative Werte (hier R9 und R12).

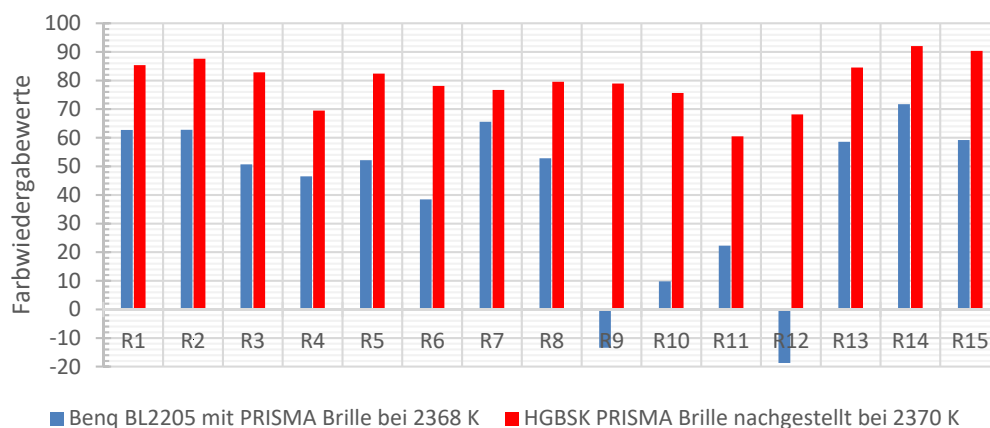


Abb. 6-41: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors mit *PRiSMA bluelightprotect* und der HGBSK (*PRiSMA* simuliert)

Auch hier kann im Vergleich (*Benq* Monitor betrachtet mit der Bildschirmbrille und HGBSK) eine Steigerung der Farbwiedergabewerte erreicht werden (Abb. 6-42).

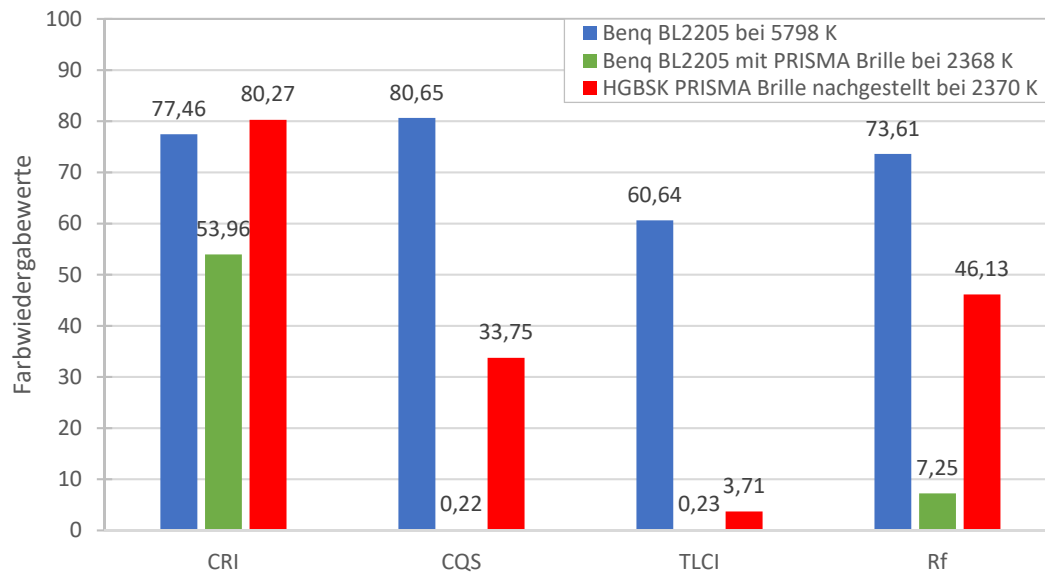


Abb. 6-42: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes von Benq Monitor, Benq Monitor mit *PRiSMA bluelightprotect* und HGBSK (*PRiSMA* simuliert)

Mit der HGBSK kann eine deutlich verbesserte Hintergrundbeleuchtung mit gesteigerter Farbwiedergabe erreicht werden (Tab. 6-7).

Lichtqualitäts-indizes	Farbwiedergabewerte <i>Benq</i> BL2205 mit <i>PRiSMA</i> Brille	Farbwiedergabe- werte HGBSK	Verbesserung mit der HGBSK in %
<b>CRI</b>	53,96	80,27	48
<b>CQS</b>	0,22	33,75	15346
<b>TLCI</b>	0,23	3,71	1496
<b>Rf</b>	7,25	46,13	536

Tab. 6-7: Übersicht Verbesserung durch die HGBSK

### 6.2.4 Optimierung durch Konfiguration der HGBSK

Die Abschnitte 6.2.1, 6.2.2 und 6.2.3 haben gezeigt, dass mit der entwickelten LED-Hintergrundbeleuchtung alle Farbtemperatureinstellungen der einzelnen Blaulichtfilter nachgestellt werden können. Einige dieser Einstellungen sind im folgenden CIE-Diagramm von 1931 aufgetragen (Abb. 6-43). Die eingestellten Modi von  $f_{lux}$  bewegen sich alle entlang der Black-Body-Kurve und sind vom Benutzer individuell frei wählbar. Alle diese Modi können mit der LED-Hintergrundbeleuchtung unter Verwendung der HGBSK nachgestellt werden.

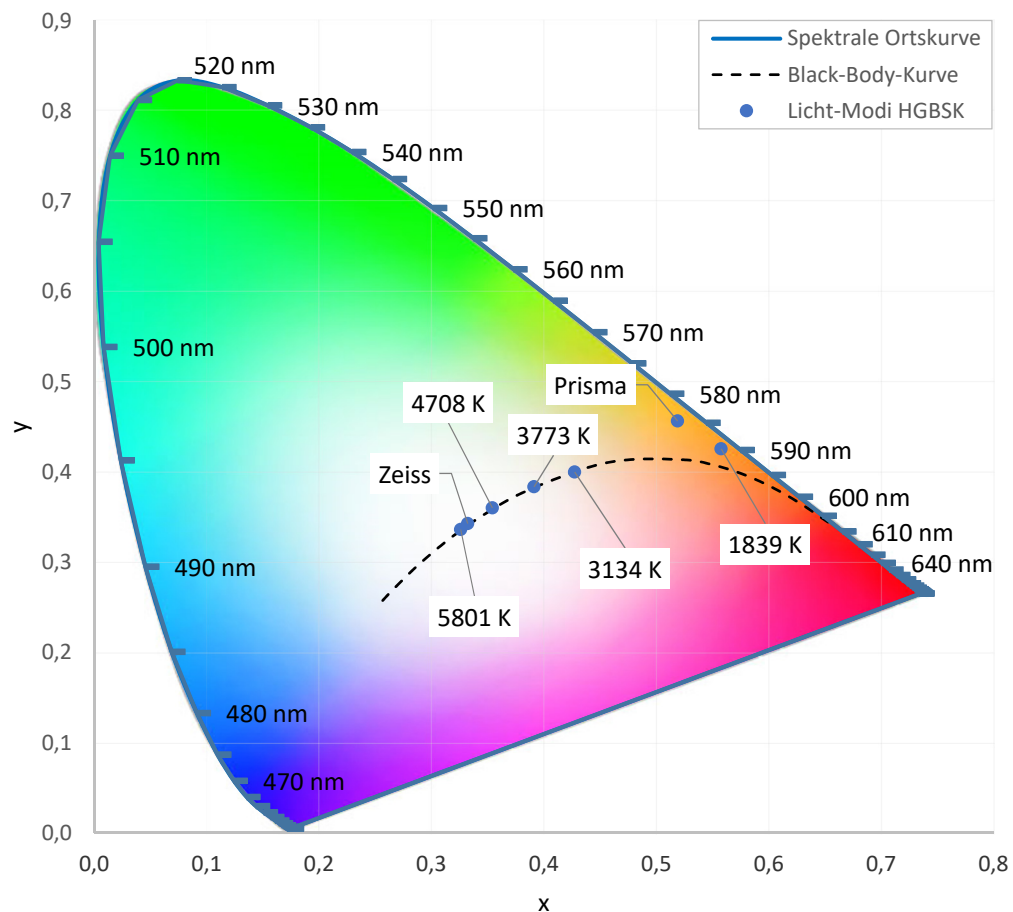

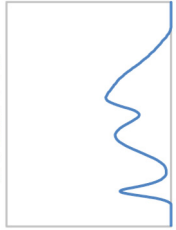
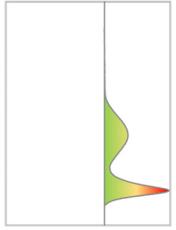

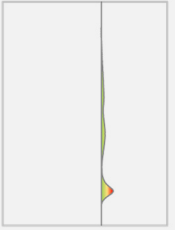

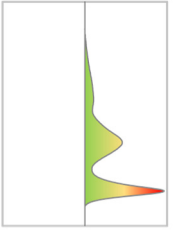

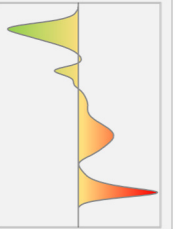


Abb. 6-43: Übersicht einiger gesteuerter Licht-Betriebsarten der HGBSK

Die Hintergrundbeleuchtung durch mehrere LEDs zu steuern, liegt auf der Hand. Der Blaulichtanteil kann auf ein Minimum gesenkt werden, und die Farbwiedergabewerte werden fast immer gesteigert.

Die unterschiedlichen Verfahren zur Blaulichtvermeidung sind in der nachfolgenden Tabelle 6-8 gegenübergestellt.

	Lichtspektrum	Blaulichtreduzierung gegenüber „Ausgangssituation“	Vorteile	Nachteile	Kosten
<b>Ausgangssituation</b> (z. B. <i>Benq</i> BL2205)	s. Abb. 6-14 	entfällt	ein LED-Typ für die Hintergrundbeleuchtung kostengünstige Herstellung	4 Betriebsarten für Blaulichtreduzierung Blaulichtbetriebsarten reduzieren die Beleuchtungsstärke Blaulichtpeak bleibt bestehen	108 €
<b>Software</b> (z. B. <i>f.lux</i> )	s. Abb. 6-25 	s. Abb. 6-25 	einfach zu installieren einfach zu konfigurieren	Reduktion der Beleuchtungsstärke Blaulichtpeak bleibt bestehen	gratis
<b>Brillenglasbeschichtung</b> (z. B. <i>ZEISS</i> )	s. Abb. 6-32 	s. Abb. 6-32 	einfach einzusetzen	Kaum wirksam, sehr kleiner Blaulichtanteil wird herausgefiltert Tragen einer Bildschirmbrille erforderlich	unbekannt
<b>Filter (z. B. Bildschirmbrille PRISMA)</b>	s. Abb. 6-38 	s. Abb. 6-38 	einfach einzusetzen 99 % Filterwirkung der Strahlungsleistung im Bereich von 380 – 500 nm	Farbtemperatur gewöhnungsbedürftig Tragen einer Bildschirmbrille erforderlich	55 €
<b>HGBSK</b>	s. Abb. 6-39 	s. Abb. 6-39 	viele verschiedene Betriebsarten Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur variabel einstellbar an beliebige Szenarien anpassbar	Prototyp besteht aus 46 LEDs Ansteuerung und Micro-Controller erforderlich	ca. 240 €

Tab. 6-8: Übersicht verschiedener Möglichkeiten der Blaulichtreduzierung

Aus Tabelle 6-8 ist zu erkennen, dass die entwickelte LED-Hintergrundbeleuchtung mehrere Vorteile bietet. Viele verschiedene Betriebsarten, Beleuchtungsstärken und Farbtemperaturen können beliebig eingestellt werden. Somit ist unter Verwendung der HGBSK die LED-Hintergrundbeleuchtung an alle erdenklichen Szenarien anpassbar. Es muss keine Bildschirmbrille verwendet werden.

Durch die LED-Hintergrundbeleuchtung mit steuerbarem Farbspektrum kann der Blaulichtanteil minimiert oder ganz deaktiviert werden. Die Verringerung der Blaulichtemission im Lichtspektrum führt teilweise auch zu einer verbesserten Farbwiedergabe. Die Änderung des Lichtspektrums hat Auswirkungen auf Parameter wie z. B. Beleuchtungsstärke, Kontrast und Sättigung, da jedes LCD auf die jeweils benutzte Hintergrundbeleuchtung abgestimmt ist. Eine Kalibrierung des LCD mit z. B. einem Monitorkalibrierungstool („Anhang E: Kalibrierung der LCD“) ist daher sinnvoll.

Eine optimale Einstellung der Hintergrundbeleuchtung sollte so gewählt werden, dass der Blaulichtanteil im Lichtspektrum soweit verringert oder deaktiviert wird, dass negative Auswirkungen auf den menschlichen Organismus vermieden werden. Die konstruierte und realisierte LED-Hintergrundbeleuchtung deckt im Vergleich zum *Benq* BL2205 Monitor einen etwas größeren Farbraum ab (Abb. 6-44).

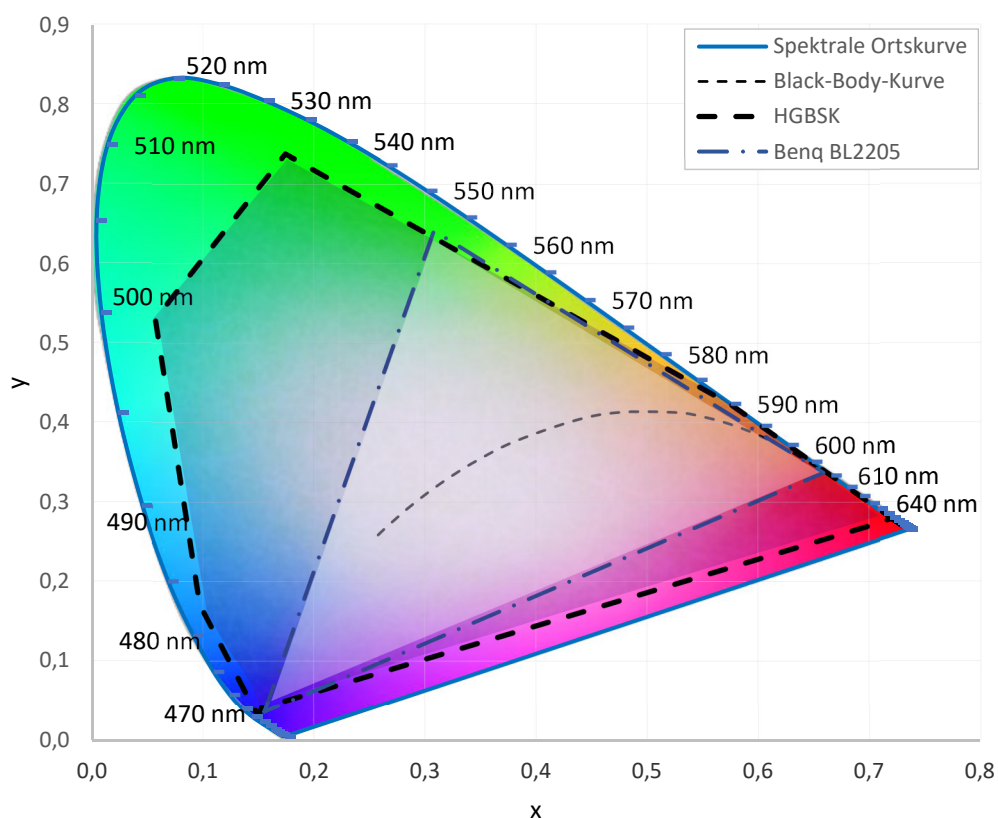


Abb. 6-44: Farbräume im Vergleich HGBSK / Benq Monitor

Der Benutzer kann die LED-Hintergrundbeleuchtung für sein Empfinden optimal einstellen. Er kann z. B. eine kalte Farbtemperatur („Mode 1“) für ermüdungsfreies Arbeiten am Abend, eine Farbtemperatur mit weniger Blaulichtemission („Mode 2“) oder eine Farbtemperatur ohne Blaulicht („Mode 3“) wählen.

Diese drei Modi sind wie folgt konfiguriert:

- Mode 1 mit Blaulicht (Kanal 2 und 3 aktiviert),
- Mode 2 mit reduziertem Blaulicht (Kanal 3 aktiviert),
- Mode 3 kein Blaulicht im Farbspektrum (Kanal 2 und 3 deaktiviert).

	DMX Wertebereich								Betriebsarten mit der HGBSK		
	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 6	Kanal 7	Kanal 8	Mode 1	Mode 2	Mode 3
<b>Beleuchtungsstärke in Lux</b>	0	96	22	163	255	0	0	155	124	120	84
<b>Farbtemperatur in K</b>	0	0	69	107	255	0	0	144	5782	4471	2301
<b>Farbwiedergabe <math>R_e</math></b>	0	0	0	56	206	40	0	125	95,75	80,11	90,14

Tab. 6-9: Übersicht Betriebsarten HGBSK

Aus Tabelle 6-9 ist zu erkennen, dass bei aktivierten Blaulichtkanälen ein Farbwiedergabewert von über 95 erreicht wird. Bei Deaktivierung des zweiten Blaulichtkanals sinkt der Farbwiedergabewert. Die Lichtspektren der drei Modi sind in Abb. 6-45 dargestellt.

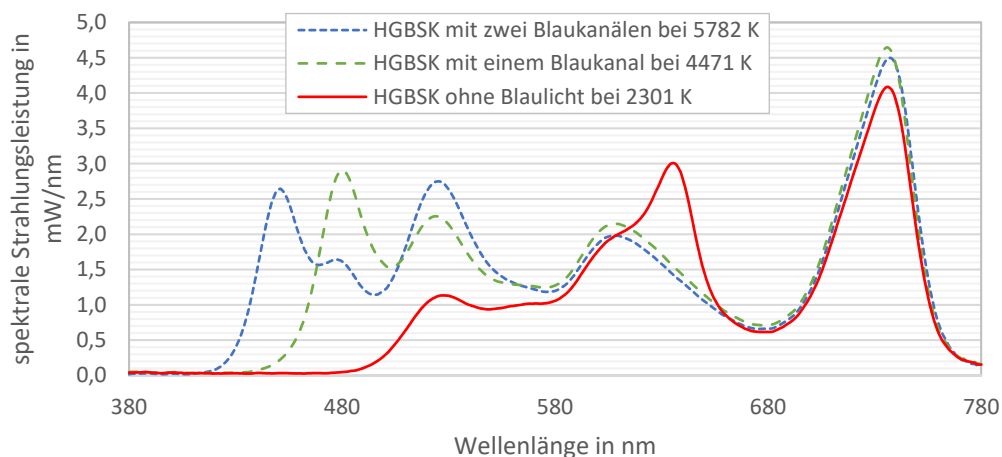


Abb. 6-45: Vergleich der Lichtspektren der HGBSK mit und ohne Blaulichtkanäle

Der reduzierte Blaulichtanteil im „Mode 1“ gegenüber dem *Benq* Monitor bei ähnlichster Farbtemperatur ist in Abb. 6-46 erkennbar. Dabei sind die Kanäle 2 und 3 für Blaulicht aktiviert.

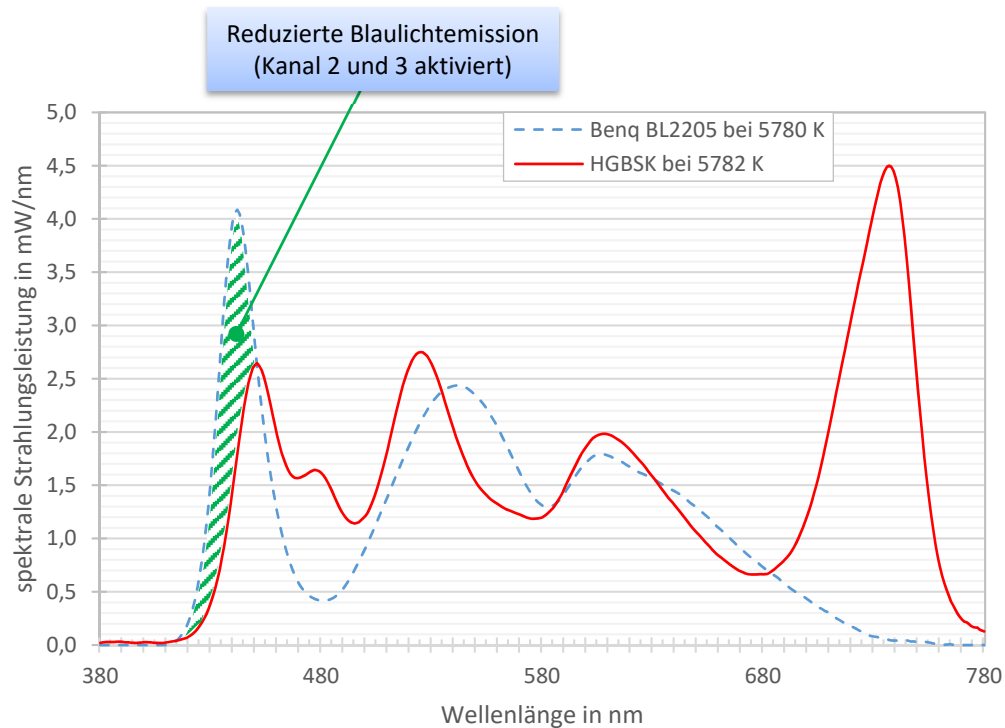


Abb. 6-46: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK („Mode 1“)

Wird der Blaulichtanteil weiter reduziert („Mode 2“), Kanal 2 deaktiviert, ergibt dies eine Reduzierung der Blaulichtemission im Bereich von 410 – 465 nm (Abb. 6-47).

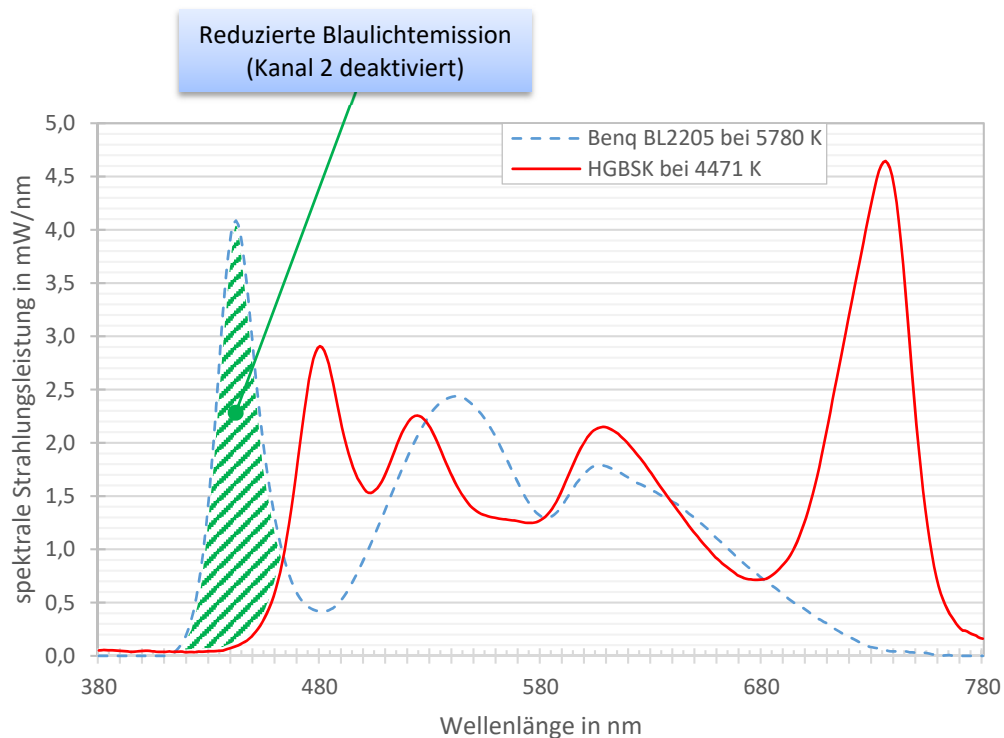


Abb. 6-47: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK („Mode 2“)



Bei „Mode 3“ werden beide Blaulichtkanäle deaktiviert. Die Blaulichtemission wird im Bereich von 410 – ca. 490 nm komplett deaktiviert (Abb. 6-48). Dabei ändert sich die Farbtemperatur auf 2301 K und die Lichtfarbe Weiß des LCDs erscheint für den Benutzer wärmer.

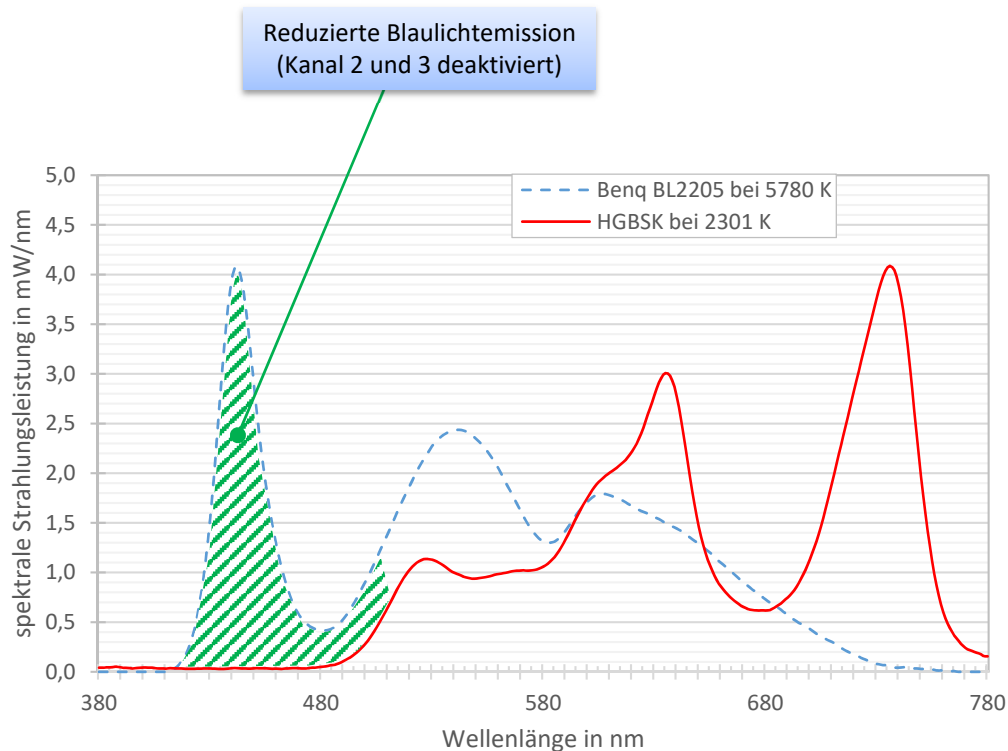


Abb. 6-48: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors und der HGBSK („Mode 3“)

Es ergeben sich folgende technische Randbedingungen für den Versuchsstand:

- Betrieb von maximal neun LED-Gruppen,
- maximaler Konstantstrom der LEDs: 350 mA,
- Ausgangsspannung an einer LED-Gruppe: 6 – 36 V,
- Dimmung: 256 Schritte (0 – 255),
- LED Colorpeaks: 401 nm, 449 nm, 477 nm, 525 nm, 596 nm, 635 nm, 657 nm und 725 nm,
- Nachbildung der Ulbricht-Kugel aus Styropor, Durchmesser: 500 mm,
- beleuchtete LCD-Fläche: 100 mm x 100 mm.

Das Lichtspektrum der HGBSK bei 2301 K („Mode 3“) kann durch Verwendung weiterer LEDs mit Colorpeaks im Bereich von 630 nm bis 740 nm dem spektralen Verlauf einer Halogenleuchte weiter angepasst werden.

## 7 Resümee und Ausblick

Die LED-Hintergrundbeleuchtungen weisen in der Regel alle eine sehr hohe Blaulichtemission im Lichtspektrum auf. Diese hohe Blaulichtemission kann eine nachteilige oder gar schädigende Wirkung auf den menschlichen Organismus haben. Deshalb ist es sinnvoll, nach Lösungen zur Blaulichtreduzierung im Lichtspektrum der LED-Hintergrundbeleuchtungen zu suchen.

Die Untersuchung der vorliegenden Arbeit zeigt, dass die Blaulichtemission durch eine LED-Hintergrundbeleuchtung mit einem steuerbaren Farbspektrum gezielt reduziert bzw. ganz vermieden werden kann.

Die für die Analyse und Auswertung von Lichtspektren konstruierte LED-Leuchte mit steuerbarem Farbspektrum kann die Betriebsarten von herkömmlichen Filterlösungen, wie z. B. Monitoren mit implementierten Blaulichtprogrammen, Hardwarefilter und Software-Lösungen zur Reduzierung des Blaulichtanteils, abbilden. Die Nachbildung von Blaulichtfiltern bzw. die Modellierung verschiedener Farbspektren bietet durch die individuelle Bedienbarkeit der HGBSK im Vergleich zu herkömmlichen Filteranwendungen viele Vorteile. Durch das steuerbare Farbspektrum werden alle Farbtemperaturen, die für Monitore einstellbar sind, berücksichtigt. Mit einem Micro-Controller und einer geeigneten Open-Source-Software kann die Blaulichtemission im Lichtspektrum zuverlässig gesteuert, verringert oder ganz deaktiviert werden.

Die Hintergrundbeleuchtung in der Bildschirmtechnik wird sich rasant weiterentwickeln. Die ersten Hersteller von Monitoren und Fernsehern bieten bereits Geräte mit OLEDs (*Organic Light Emitting Diode*) an, einer ganz neuartigen zukunftsweisenden Technik auf der Basis von selbstleuchtenden Pixeln. Diese Technik muss dann gleichermaßen auf ihre Blaulicht-Eigenschaften untersucht werden. Mit der OLED Technologie ist es z. B. möglich, einzelne Pixel an- bzw. abzuschalten. In wie weit das sinnvoll genutzt und im Hinblick auf eine Steuerung von Farbemissionen im Lichtspektrum verwendet werden kann, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Bisher beschränkt sich der Einsatz von OLEDs vor allem auf den Smartphone-Bereich und auf einige wenige TV-Geräte.

Eine weitere technische Anwendung in diesem Bereich ist die HDR-Technik (*High Dynamic Range*). Sie wird in Teilbereichen der Kino- und Fernsehtechnik verwendet und wird über den HDR Farbraum REC2020 definiert. Ein ausgezeichneter Kontrast und eine wesentlich höhere Leuchtdichte bis zu 10.000 cd/m<sup>2</sup> (Dolby Laboratories, Inc., 2016) zeichnen diese Anwendung aus. Ein solche Leuchtdichte wird bisher noch von keinem TV-Gerät auf dem Markt erreicht. Eine große Leuchtdichte kann aber auch eine hohe Blaulichtemission bedeuten. Inwiefern hohe Leuchtdichtewerte in der HDR-Technik dem

menschlichen Organismus schaden und sich möglicherweise auf die Melatoninausschüttung im menschlichen Körper auswirken, ist zu hinterfragen. Auch alternative Techniken wie QLEDs (*Quantum-dot Light-Emitting Diode*) und RGB-Laser, die in Zukunft möglicherweise verstärkt für Hintergrund- und oder Flächen-Beleuchtung eingesetzt werden, müssen sich der Betrachtung ihres Lichtspektrums in Bezug auf eine hohe Blaulichtemission mit den damit verbundenen Nachteilen stellen.

Für den Versuchsstand sollte im Hinblick auf eine optimale Dimensionierung der beleuchteten Fläche die entwickelte LED-Leuchte miniaturisiert und als „Komplett-LED-Leuchte“ ausgeführt werden. Die Mindestanforderungen an den Steuerungsrechner sind eine DMX-Dimmer-Steuerung, ein geeignetes Betriebssystem für die Steuerungssoftware QLC + sowie geeignete Eingänge für mögliche Erweiterungen (Sensoren). Auf dieser Basis und der Grundlage der betrieblichen Kenngrößen des Versuchssystems (Rechenleistung, Funktionalität) sollten die Bausteine (Abb. 5.8) geprüft, optimiert und ggf. durch alternative Bausteine ersetzt werden.

Die Blaulichtvermeidung an der Schnittstelle Mensch-Maschine mit der positiven Auswirkung auf den Menschen muss nicht zwingend für jede Anwendung gleichermaßen gut geeignet sein. Die Auswirkungen auf die Wiedergabe anwendungsbezogener Darstellungen sollten für die Beurteilung von Displays oder Display-Hintergrundbeleuchtungen untersucht werden. Interessant wären in diesem Zusammenhang Untersuchungen der Lesbarkeit, des Kontrastes und der Schärfe der Abbildungen in Abhängigkeit der Steuerung zwischen der neu entwickelten Hintergrundbeleuchtung zu herkömmlichen Displays mit Hintergrundbeleuchtung. Forschungsarbeiten in Bereichen, wie z. B. Lichttechnik, Pflanzenzucht, Aquaristik, Medizintechnik oder Verkehrstechnik könnten Erkenntnisse über eine sinnvolle anwendungsbezogene Reduzierung der Blaulichtemission bei der Hintergrundbeleuchtung geben.

Daher gilt auch in Zukunft bei beleuchtenden, bildgebenden oder beleuchteten Flächen, die Auswirkungen der jeweils vorhandenen Lichtspektren individuell zu betrachten. Bei der Anpassung und Optimierung der Beleuchtungsqualität an die jeweiligen technischen Anforderungen darf die Auswirkung auf das Wohlbefinden und die Konzentrationsfähigkeit des Menschen nicht außer Acht gelassen werden. Tageszeit, Farbwiedergabe und ein beliebig einstellbarer Sonnenlichttemperaturverlauf sind dabei wichtige Steuerungsparameter für die Hintergrundbeleuchtungssysteme. Mit dieser Arbeit steht ein Grundkonzept für die kritische Auseinandersetzung mit Lichtspektren zur Verfügung, das praxisnah Untersuchungen von Beleuchtungsszenarien zur Vermeidung von Blaulichtemissionen wesentlich unterstützen kann.

## Glossar

**Baffel:** Ein Baffel ist eine Abschirmung gegen direkte Licht-Einstrahlung in den Messport der Ulbricht-Kugel.

**Bariumsulfat:** Bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ) wird für die Beschichtung der Innenseite von Ulbricht-Kugeln verwendet. Zweck der  $\text{BaSO}_4$ -Beschichtung ist es, eine möglichst diffus reflektierende Innenbeschichtung zu erreichen.

**Beleuchtungsstärke:** „Die Beleuchtungsstärke ist ein Maß für das auf eine Fläche auftreffende Licht. Die Einheit ist Lux.“ (Greule, 2014, S. 39)

**Bildschirmbrille:** Eine Brille, die beim Arbeiten an einem Bildschirm vom Benutzer getragen werden kann. Die Bildschirmbrillen können z. B. den Blaulichtanteil im Lichtspektrum minimieren.

**Black-Body-Kurve:** Die Black-Body-Kurve stellt die Farbtemperatur eines idealen Strahlers (schwarzer Körper) dar.

**Blaulichtanteil:** Der Blaulichtanteil ist der Anteil im Lichtspektrum mit einem Wellenlängenbereich von ca. 380 nm – 480 nm.

**CCFL:** *Cold Cathode Fluorescent Lamp* ist eine Leuchtstofflampe, die UV-Licht durch einen entsprechenden Leuchtstoff in sichtbare Strahlung umwandelt. CCFLs werden z. B. für LCD-Hintergrundbeleuchtungen eingesetzt.

**CIE-Diagramm:** Das CIE-Diagramm wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE – *Commission internationale de l'éclairage*) definiert. Es beschreibt den Zusammenhang der Farbwahrnehmung des Menschen und des Farbreizes.

**Circadianer Rhythmus:** Der Circadianer Rhythmus ist der biologische Rhythmus eines Lebewesens mit einer Dauer von etwa 24 Stunden.

**Colorpeaks:** Wellenlängen-Maxima im Lichtspektrum einer farbigen LED.

**CRI:** siehe Farbwiedergabeindex

**DALI:** DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) gilt als Standard für dimmbare elektronische Vorschaltgeräte (EVGs). Für den Anschluss an ein DALI-EVG wird eine fünfadrigere Leitung benötigt (Phase, Neutralleiter, Schutzleiter und zwei Steuerleitungen für das DALI-Protokoll). Es lassen sich bis zu 64 Geräte einzeln steuern.

**Dimmer:** Beim PWM-Dimmer (Pulsweitenmodulierung) wird über ein PWM-Signal die Stromquelle ein- und ausgeschaltet. Durch das getaktete PWM-Signal kann die elektrische Leistung an einer angeschlossenen Lichtquelle gesteuert werden. Bei einem

Phasenanschnitt /-abschnitt-Dimmer wird der sinusähnliche Verlauf der Spannung an-, oder abgeschnitten, um eine Leistungsreduzierung der angeschlossenen Lichtquelle zu erreichen.

**Direct-LED:** Eine große Anzahl von LEDs wird hinter dem LCD über die gesamte Bildfläche verteilt. Die Diffusorscheibe mit Mikrolinsen oder Mikro-Lasergravur verteilt Licht gleichmäßig auf der Fläche des LCDs.

**Dotierung:** Bezeichnet in der Halbleitertechnik das Einbringen von Fremdatomen.

**Elektrolumineszenz-Folie:** Elektrolumineszenz-Folien bestehen aus zwei leitenden Schichten, einer transparenten Elektrode und der reflektierenden Metallelektrode. Zwischen diesen beiden Elektroden befinden sich die Elektrolumineszenz-Schicht und der Isolator.

**f.lux:** Die Software *f.lux* kann auf einem Computer installiert werden und zur Minimierung des Blaulichts beitragen.

**Farbspektrum:** Spektraler Verlauf einer Lichtquelle.

**Farbtemperatur:** Maßeinheit der Lichtfarbe in Kelvin (K) (Greule, 2014, S. 29).

**Farbwiedergabeindex:** Der Farbwiedergabeindex (CRI) besteht aus acht Referenzfarben  $R_a$ . Die Anzahl der Referenzfarben wurde durch die große Menge neuer Leuchtmittel wie LEDs und Leuchtstoffröhren auf 14 bzw. 15 Referenzfarben erweitert. Der erweiterte Farbwiedergabeindex ist unter der Abkürzung  $R_e$  bekannt. Diese Anzahl von Referenzfarben stellt lediglich eine kleine Auswahl aller möglichen Farbwerte dar, die eine ideale Lichtquelle abbilden kann.

**Fidelity-Index:** 2015 veröffentlichte die nordamerikanische IES (*Illuminating Engineering Society*) einen neuen Standard zur Bestimmung der Farbwiedergabe. Die Palette der Referenzfarben umfasst 99 Farben. Der  $R_f$  (Fidelity-Index) beschränkt sich dabei auf einen Wertebereich von 0-100.

**HDR:** Mit HDR (*high dynamic range*) kann das auf Anzeigegeräten dargestellte Bild verbessert werden. Die Bildbereiche, die zu hell sind, werden abgedunkelt, die die zu dunkel erscheinen, werden aufgehellt. Es werden mehr Details sichtbar, das heißt der Dynamikumfang des Bildes steigt. Zudem kann bereits bei der Aufnahme von Video und Foto HDR verwendet werden. Somit ist bei der Aufnahme ein höherer Dynamikumfang des Bildes vorhanden. Die Qualität des dargestellten Bildes auf einem HDR-Anzeigegerät steigt weiter an.

**HGBSK:** Die HGBSK (Hintergrundbeleuchtungssimulatorkugel) besteht aus der Nachbildung einer Ulbricht-Kugel aus Styropor. Diese bietet genügend Platz für die Aufnahme der LED-Leuchte sowie deren Ansteuerung. Zusätzlich ist eine Öffnung zur

Beleuchtung eines LCDs vorgesehen. Mit Hilfe dieses Aufbaus können Flächen, z. B. LCDs, Glas- und Kunststoff-Platten homogen beleuchtet werden.

**Kalibrierung:** Kalibrierung ist ein Messvorgang zur Feststellung von Abweichungen.

**Leuchtdichte:** “Die Leuchtdichte ist ein Maß für den Helligkeitseindruck, den das Auge von einer selbstleuchtenden oder einer beleuchteten Fläche hat.” (Greule, 2014, S. 43)

**Leuchtenträger:** Träger, auf dem LEDs angebracht sind.

**Lichtausbeute:** Der Quotient (Lichtstrom/Leistung) beschreibt die Lichtausbeute eines Leuchtmittels.

**Lichtfarbe:** wird als warmweiß, neutralweiß oder tageslichtweiß charakterisiert. Die drei Bereiche der Lichtfarbe sind durch die Farbtemperatur in Kelvin (K) festgelegt. (Greule, 2014, S. 29)

**Lichtqualitätsindizes:** Weitere Farbwiedergabeindizes

**Lichtstrom:** gibt an, wieviel Licht eine Lichtquelle erzeugt.

**Local Dimming:** Durch die *Local Dimming*-Funktion kann die Kontrastwirkung von Displays optimiert werden. Dies geschieht durch die separate Ansteuerung jeder einzelnen LED. Somit kann jede LED in ihrer Helligkeit geregelt (gedimmt) oder abgeschaltet werden.

**Normfarbwerte:** Die spektrale Verteilung des gemessenen Lichts wird mit den drei Normspektralwertfunktionen multipliziert und anschließend aufsummiert, woraus sich die drei Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  ergeben:

**OLED:** Die OLEDs (*organic light emitting diode*) sind organische Leuchtdioden, mit denen selbstleuchtende Pixel hergestellt und z. B. auf Folien gedruckt werden können. Damit ergeben sich ganz neue Möglichkeiten in der Bildschirmtechnik.

**Peak:** Die Peak-Wellenlänge stellt das Maximum der spektralen Verteilung da.

**Pi-LED System:** Das PI-LED System besteht aus vier verschiedenen LEDs (blau, hellgrün, dunkelgrün und rot). Durch das PI-LED System wird ein HCL (*Human Centric Lighting*) simuliert, welches einen sehr hohen Farbwiedergabeindex  $R_a$  und eine große Dynamik der Farbtemperatur (2500 K – 7000 K) aufweist.

**Quantenpunktconverter:** Quantenpunktconverter besitzen Quantenpunkte (Nanokristalle), in denen Quanteneffekte auftreten. Diese Quanteneffekte beeinflussen die Elektronen, um von einem Energieband zum anderen zu gelangen. Der Energiewechsel bestimmt die Farbe (des emittierenden Lichts) des Quantumdots. Blaues Licht aus blauen LEDs bestrahlt rote und grüne Quantenpunkte. Diese werden durch die Bestrahlung angeregt und wandeln ein Teil des blauen Lichts in rotes bzw. grünes Licht um. Durch die Farbmischung der RGB-Farben (rot, grün und blau) entsteht ein Lichtspektrum von

weißem Licht, welches einen größeren Farbraum abdeckt, als eine LED-Hintergrundbeleuchtung ohne Quantenpunkt-konvertern.

**Schwarzwert:** Ein Helligkeitswert, der die dunkelsten Bilddetails auf einem LCD beschreibt.

**spektrale Addition:** Eine Addition zweier oder mehrerer Lichtspektren.

**Strahlungsleistung:** Die Strahlungsleistung ist das Verhältnis aus Strahlungsenergie und Zeit.

**Transmissionsgrad:** Der Transmissionsgrad ist das Verhältnis der Strahlungsleistung, die die Austrittsfläche eines optischen Mediums verlässt zur auf die Eintrittsfläche auftreffenden Strahlungsleistung.

**Ulbricht-Kugel:** Die Ulbricht-Kugel bietet die Möglichkeit, Strahlung von Lichtquellen zu sammeln und den "Lichtstrom" dieser Quellen zu analysieren. Das an die Ulbricht-Kugel angeschlossene Spektrometer nimmt die lichttechnischen Kenndaten, wie z. B. Farbtemperatur, Farbwiedergabe oder Beleuchtungsstärke, für weiterführende Auswertungen auf.

## Literaturverzeichnis

- AIRBUS. (2016). *Lighting*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/comfort/lighting/>
- analytikjena. (2007). *Grundlagen Instrumentation und Techniken der UV VIS Spektroskopie*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/files/3810.pdf>
- ASSIST. (03 2010). *AR-SpecifyColorRec-March2010*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-SpecifyColorRec-March2010.pdf>
- Asus. (2016). *Eye Care Technology*. Abgerufen am 30. 11 2016 von [https://www.asus.com/Microsite/2015/display/eye\\_care\\_technology/](https://www.asus.com/Microsite/2015/display/eye_care_technology/)
- Aurelien, D., Fini, P., Houser, K., Ohno, Y., Royer, M., Smet, K., . . . Whitehead, L. (2015). Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources. *Optics express*(12), S. 15888–15906. doi:10.1364/OE.23.015888
- Baaijens, J., Van, D., Poort, S., & de Boer, T. (2016). *Patentnr. WO2016096387 A1*.
- Barroso, A., & SOUDANT, R. (2012). *Patentnr. WO2012095765 A2*.
- BAuA. (04 2011). *Technische Regeln für Arbeitsstätten*. Abgerufen am 30. 11 2016 von [http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?__blob=publicationFile)
- BMBF. (2014). *Projekt: Optimierte Lichtsysteme zur Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Gesundheit (OLIVE)*. Abgerufen am 30. 11 2016 von [http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/4.\\_LED/Beleuchtung%20LED%20barrierefrei/Olive-Projektsteckbrief-bf.pdf](http://www.photonikforschung.de/fileadmin/Verbundsteckbriefe/4._LED/Beleuchtung%20LED%20barrierefrei/Olive-Projektsteckbrief-bf.pdf)
- Bourzac, K. (17. 01 2013). Quantum dots go on display. *Nature*(7432), S. 283. doi:10.1038/493283a
- Bowmaker, J., & Dartnall, H. (1980). Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal of Physiology*(1), S. 501-511. doi:10.1113/jphysiol.1980.sp013097
- Breitmaier, E., & Jung, G. (2005). *Organische Chemie* (Bde. 5., überarb. Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Cajochen, C., Frey, S., Anders, D., Späti, J., Bues, M., Pross, A., . . . Stefani, O. (17. 3 2011). Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer



- screen affects circadian. *Journal of applied physiology*(5), S. 1432–1438.  
doi:10.1152/japplphysiol.00165.2011
- Chang, A.-M., Aeschbach, D., Duffy, J., & Czeisler, C. (26. 11 2015). Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. (PNAS, Hrsg.) *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*(4), S. 1232–1237.  
doi:10.1073/pnas.1418490112
- CIE Standard Colorimetric Observer Data. (1931). *R I T Rochester Institute of Technology*. Abgerufen am 30. 11 2016 von [http://www.rimcsl.org/UsefulData/all\\_1nm\\_data.xls](http://www.rimcsl.org/UsefulData/all_1nm_data.xls)
- Dehler, E., Freyer, U., Häberle, G., Jeschke, M., Münch, H., & Schiemann, B. (2015). *Fachkunde Büro- und Informationselektronik*. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney.
- Deutsche Gesundheitshilfe e.V. (Hrsg.). (11 2014). Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://download.gesundheitshilfe.de/Broschuere-Schlafstoerungen.pdf>
- Dolby Laboratories, Inc. (2016). *Dolby Vision for the Home*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-vision/dolby-vision-white-paper.pdf>
- EIZO. (2016). *Eigenschaften EV2455 FlexScan*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://www.eizo.de/flexscan/ev2455-bk/>
- Engelmann, K., & Funk, R. H. (2009). Kataraktextraktion und Blaulicht--Wirkung auf die Netzhaut. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, 226(10), S. 829–838.  
doi:10.1055/s-0028-1109529
- Europäischen Union. (18. 03 2009). *VERORDNUNG (EG) Nr. 244/2009 DER KOMMISSION*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0244&from=DE>
- Europäischen Union. (18. 03 2009). *VERORDNUNG (EG) Nr. 245/2009 DER KOMMISSION*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0245&qid=1493655599077&from=EN>
- European Broadcasting Union. (2012). *Television Lighting Consistency Index 2012*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://tech.ebu.ch/tlci-2012>
- European Commission. (8. 6 2011). *DIRECTIVE 2011/65/EU*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=EN>

- European Commission. (4. 7 2012). *DIRECTIVE 2012/19/EU*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>
- flux. (2016). *flux*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://justgetflux.com/>
- GLOPTIC. (2016). *GL Opti Light LED*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://gloptic.com/products/gl-opti-light-led/?lang=de>
- Greule, R. (2014). *Licht und Beleuchtung im Medienbereich*. HANSER.
- Hardy-infinity. (2016). *Blaulichtfilter - Augenpflege*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.ne.hardyinfinity.bluelightfilter.free>
- Hering, E., Martin, R., & Stohrer, M. (2016). *Physik für Ingenieure*. springer Vieweg.
- Herremans, H., Schlangen, L., & Geerdinck, L. (2012). *Patentnr. WO2012011008 A1. Innovative Eyewear*. (2016). Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.innovative-eyewear.com/>
- Kohlrausch, F. (2013). *Praktische Physik* (Bd. 2). Springer-Verlag.
- KOMPENDIUM. (o. J.). *LCD-Backlight-Technologien*. (InfoTip Service GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://kompendum.infotip.de/backlight-technologien.html>
- Kunz, P. D. (2015). *CircadiaWirksamkeit AmI-basierter Beleuchtungssysteme: Wirkungsfragen circadianer Desynchronisation*. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Lee, C., Roth, G., & Tews, W. (2007). *Patentnr. WO2007114614 A1*.
- LUMITECH. (2016). *PI-LED, DOWNLIGHT SYSTEM - ZHAGA*. Abgerufen am 29. 11 2016 von [http://www.lumitech.at/images/PDF/db\\_de/PI-LED\\_Zhaga\\_SMD\\_de.pdf](http://www.lumitech.at/images/PDF/db_de/PI-LED_Zhaga_SMD_de.pdf)
- Maxik, F., Bartine, D., Soler, R., Grove, E., & Bretschneider, E. (2014). *Patentnr. US20140306620 A1*.
- McCamy, C., Marcus, H., & Davidson, J. (1976). A Color-Rendition Chart. *Jurnal of Applied Photographic Engineering*, S. 95-99. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.cis.rit.edu/~cnspci/references/mccamy1976.pdf>
- METRAHIT. (26. 01 2017). *Bedienungsanleitung Energy System Multimeter*. Abgerufen am 20. 04 2017 von [https://www.gossenmetrawatt.com/resources/tt/metrahit\\_energy/metrahit-energy-ba\\_d.pdf](https://www.gossenmetrawatt.com/resources/tt/metrahit_energy/metrahit-energy-ba_d.pdf)

- NEC Lighting, Ltd. (2016). *What is a Cold Cathode Fluorescent Lamp (CCFL)?* Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://www.nelt.co.jp/english/products/ccfl/about.html>
- Neudeck, S. (22. 9 2015). *Warum flackern manche Zeitlupenaufnahmen?* Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.frag-den-neudeck.de/Archive/13800/print/>
- Ohno, Y., & Davis, W. (8. 6 2010). Color Quality Scale. *Opt. Eng (Optical Engineering)*(3), S. 033602. doi:10.1117/1.3360335
- Okumura, Y. (2004). *Patentnr. EP1462711 A1*.
- PHILIPS. (2016). *Presse*. Abgerufen am 30. 11 2016 von [http://www.philips.de/a-w/about/news/archive/standard/news/consumerlifestyle/20160901\\_erster\\_oled\\_4k\\_tv.html](http://www.philips.de/a-w/about/news/archive/standard/news/consumerlifestyle/20160901_erster_oled_4k_tv.html)
- PHILIPS. (2016). *Projektbericht Schulbeleuchtung*. Abgerufen am 29. 11 2016 von [http://www.newscenter.philips.com/pwc\\_nc/main/shared/assets/at/Downloadablefile/presse/04112010/Lay\\_CE5\\_SchoolVision\\_251010.pdf](http://www.newscenter.philips.com/pwc_nc/main/shared/assets/at/Downloadablefile/presse/04112010/Lay_CE5_SchoolVision_251010.pdf)
- powerelectronics. (2016). *CIE Normfarbtafel mit eingezeichnetem NTSC-, RGB-LED-, White LED- und CCFL Farbraum*. Abgerufen am 21. 11 2016 von [http://powerelectronics.com/power\\_management/led\\_drivers/Fig-3-color-gamut.jpg](http://powerelectronics.com/power_management/led_drivers/Fig-3-color-gamut.jpg)
- Priese, L. (2015). *Computer Vision*. Springer-Verlag.
- Rohde, H.-C. (2007). *Die Göbel-Legende: Der Kampf um die Erfindung der Glühlampe*. zu Klampen.
- Saleh, B., & Teich, M. (2008). *Grundlagen der Photonik*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Schubert, E. (2006). *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
- Seong-Rin, L., Kang, D., Ogunseitan, O., & Schoenung, J. (2011). Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs). *Environmental science & technology*, S. 320–327. doi:10.1021/es101052q
- TCO DEVELOPMENT. (11. 11 2015). *TCO Certified Displays 7.0*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://tcodevelopment.com/files/2015/11/TCO-Certified-Displays-7.0.pdf>
- ubuntuusers. (2016). *Redshift*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://wiki.ubuntuusers.de/Redshift/>

- Udovičić, L., Mainusch, F., Janßen, M., Nowack, D., & Ott, G. (2013). *Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED)*. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- UPRtek. (14. 02 2017). *User Manual MK350S*. Abgerufen am 20. 04 2017 von [http://www.uprtek.com/v\\_comm/inc/download\\_file.asp?re\\_id=2724&fid=19417](http://www.uprtek.com/v_comm/inc/download_file.asp?re_id=2724&fid=19417)
- Urbandroid Team. (2016). *Twilight*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.urbandroid.lux&hl=>
- V., D. L. (Hrsg.). (2016). *Licht 2016*. KIT Scientific Publishing. doi:10.5445/KSP/1000057817
- Van den Bulck, J. (2007). Adolescent Use of Mobile Phones for Calling and for Sending Text Messages After Lights Out. (A. a. medicine, Hrsg.) *Sleep*, S. 1220-1223. doi:10.1093/sleep/30.9.1220
- Van der Lely, M. S., Frey, P. S., Garbazza, M. C., Wirz-Justice, P. A., Jenni, M. O., Steiner, B. R., . . . Schmidt, P. C. (7. 8 2014). Blue Blocker Glasses as a Countermeasure for Alerting Effects of Evening Light-Emitting Diode Screen Exposure in Male Teenagers. (J. o. Health, Hrsg.) *The Journal of adolescent health : official publication of the Society for Adolescent Medicine*, S. 113-119. doi:10.1016/j.jadohealth.2014.08.002
- Van, D., & Pickard, P. (2014). *Patentnr. WO2014123781A1*.
- VBG. (10 2008). *Beleuchtung im Büro*. VBG. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi856.pdf>
- VDI Wissensforum GmbH. (2015). *VDI-Tagung, Intelligente Beleuchtungssysteme mit LED*. Düsseldorf.
- ViewSonic. (2016). *BLUE LIGHT FILTER*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.viewsoniceurope.com/de/products/lcd/blue-light-filter/>
- Wessolowski, N. (2014). *Wirksamkeit von Dynamischem Licht*. Abgerufen am 29. 11 2016 von <http://d-nb.info/1051935520/34>
- Wood, B., Rea, M. S., Plitnick, B., & Figueiro, M. G. (12. 7 2012). Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. (A. Ergonomics, Hrsg.) *Applied ergonomics*. doi:10.1016/j.apergo.2012.07.008
- Wunsch, A. (2007). Kunstlicht und Sehen – Stress für das Auge durch moderne Lichtquellen. *EHK (Erfahrungsheilkunde)*, 12, S. 734–739. doi:10.1055/s-2007-986007

- ZEISS. (2016). *DuraVision® BlueProtect von ZEISS*. Abgerufen am 24. 05 2016 von [http://www.zeiss.de/vision-care/de\\_de/products-services/veredelungen-und-toenungen/veredelungen/duravision-blueprotect.html](http://www.zeiss.de/vision-care/de_de/products-services/veredelungen-und-toenungen/veredelungen/duravision-blueprotect.html)
- ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik. (04 2014). *Blaulichtgefährdung Fotobiologische Sicherheit in der Beleuchtung*. Abgerufen am 30. 11 2016 von <http://www.zvei.org/Publikationen/Fotobiologische-Sicherheit-in-der-Beleuchtung-April-14.pdf>

# Stichwortverzeichnis

## 1

1-10V Lichtsteuerung *Siehe* Steuerungsmöglichkeiten

## A

additive Farbmischung ..... 34  
 Ambientebeleuchtungen ..... 4  
 AMOLED-Display ..... 26

## B

Backlight ..... 12  
 Baffel ..... 53  
 Bariumsulfat ..... 53  
 Beleuchtungsstärke ..... 14, 89, 91  
 Betriebsarten ..... 69  
 Betriebstemperatur ..... 72  
 Bildschirmbrille ..... 93  
 Black-Body-Kurve ..... 67  
 Blaulichtanteil ..... 86, 89, 94  
 Blaulichtschutz ..... 94  
 Blue Light Filter ..... 27

## C

CCFL ..... 13  
 CIE-Diagramm ..... *Siehe* CIE-Normfarbtafel  
 CIE-Normfarbtafel ..... 15  
 ColorChecker ..... 83  
 Colorpeaks ..... 60  
 CQS ..... 38  
 CRI ..... 38, 70, *Siehe* Farbwiedergabeindex

## D

**DALI** ..... *Siehe* Steuerungsmöglichkeiten  
 Diffusorschichten ..... 20  
 Dimmer ..... 42  
 Direct-LED (Full-LED) ..... 21  
 Display-Typen ..... 10  
 DMX ..... *Siehe* Steuerungsmöglichkeiten  
 DMX-Adresse ..... 65  
 DMX-Dimmer ..... 46  
 DMX-Steuerung ..... 47  
 Dotierung ..... 58

## E

Edge Backlight ..... 20  
 elektrische Leistung ..... 70  
 Elektrolumineszenzfolien ..... 12  
 Eye Care ..... 27

## F

f.lux ..... 25, 86  
 Farbkanäle ..... 69  
 Farbspektrum ..... 37, 39  
 Farbtemperatur ..... 86, 89  
 Farbwahrnehmung ..... 31, 32  
 Farbwiedergabeindex ..... 70  
 Fidelity-Index ..... 38, 106  
 Filterlösungen ..... 31  
*Fixture* ..... 65  
 Flicker ..... 52

## G

Gleichstrom ..... 52  
 Glühlampe ..... 1

## H

Halogenleuchte ..... 66, 94  
 HDR ..... 103  
 Helligkeit ..... 2  
 HGBSK ..... 73, xiv  
*Human Centric Lighting* ..... 7, 107

## K

Kalibrierung ..... xvii  
 Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen ..... *Siehe* CCFL  
 KNX ..... *Siehe* Steuerungsmöglichkeiten  
 Kompaktleuchtstofflampen ..... *Siehe* CCFL  
 Konstantstromquelle ..... 44

## L

LED-Backlight ..... 14  
 LED-Backlight mit Quantenpunktconverter ..... 22  
 LED-Scheinwerfer ..... 4

Leuchtenträger .....	51
Lichtausbeute .....	2
Lichtqualitätsindizes .....	38
Lichtstrom .....	53
<i>Local Dimming</i> .....	21, 107

## N

Normfarbwerte .....	16, 107
Normspektralwertfunktionen .....	16, 107
Normwertanteile .....	17

## O

OLED .....	6, 19
Operationsleuchten .....	3

## P

<i>PLEXIGLAS</i> .....	55, 56
PWM-Dimmer .....	45, 105

## Q

QLC + .....	ix
Quantenpunkte .....	22
Quantenpunktconverter .....	20

## R

Raspberry Pi .....	63
<i>Redshift</i> .....	25
Reflektive Displays .....	<i>Siehe Display-Typen</i>
Reflektorschicht .....	20
Remotedesktopverbindung .....	63

## S

Schwarzwert .....	21, 30
Spektrometer .....	54
Status-LED .....	65
Steuerungsmöglichkeiten .....	42
Strahlungsleistung .....	75
Styropor-Kugel .....	74

## T

TLCI .....	38
Transflektive Displays .....	<i>Siehe Display-Typen</i>
Transmission .....	xv
Transmissionsgrad .....	xv
transmissive Displays .....	<i>Siehe Display-Typen</i>
<i>Twilight</i> .....	25

## U

Ulbricht-Kugel .....	53
----------------------	----

## V

V-Lambda-Kurve .....	33
----------------------	----

## W

Wechselstrom .....	52
--------------------	----

## Z

<i>ZEISS BlueProtect</i> .....	89
--------------------------------	----

## Anhang A: Installation von Raspbian Jessie with PIXEL

Für die Installation von *Raspbian* auf einem Raspberry Pi werden folgende Dinge benötigt:

- PC mit z. B. *Microsoft Windows* für den Image-Download und dem Schreiben des Image auf eine SD-Karte
- Image: *Raspbian Jessie with PIXEL*,  
Version: November 2016, Release date: 2016-11-25, Kernel version: 4.4
- SD-Karte (16 GB),
- Raspberry Pi.

### A1 Vorbereitung der Installation

1. Laden Sie sich auf einem PC mit Microsoft Windows von [www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org) das ISO-Abbild von *Raspbian Jessie with PIXEL* herunter (z. B. von <http://vx2-downloads.raspberrypi.org/raspbian/images/raspbian-2016-11-29/2016-11-25-raspbian-jessie.zip>).
2. Entpacken Sie dies mit einem ZIP-Programm.
3. Schreiben Sie anschließend das entpackte Image mit dem Programm *win32DiskImager* (<https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/>) auf die SD-Karte.
4. Wählen Sie durch Klicken des blauen Ordnersymbols (Abb. A-1) das Image aus.
5. Wählen Sie außerdem über das Dropdownmenü *Device* das Laufwerk aus, in dem die SD-Karte steckt.
6. Bestätigen Sie anschließend den Schreibvorgang des Images auf die SD-Karte mit dem Befehl *Write*.



#### HINWEIS!

Der Vorgang kann je nach verwendeter SD-Karte einige Minuten dauern.



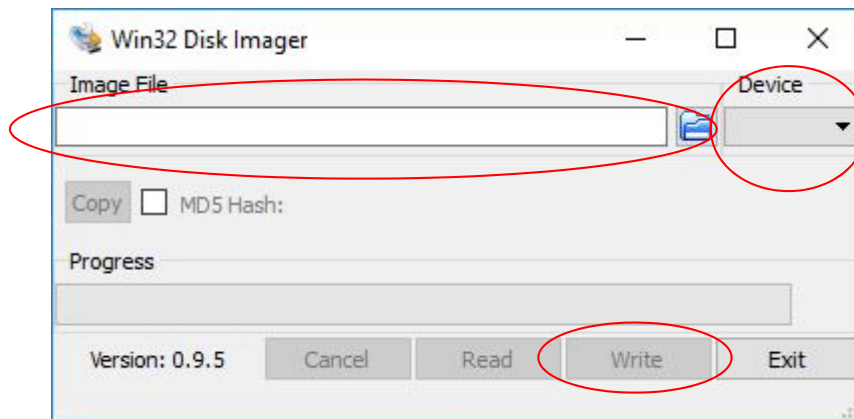


Abb. A-1: Win32 Disk Imager

7. Erstellen Sie nach Abschluss des Schreibvorgangs auf der SD-Karte eine Datei mit dem Namen „ssh“, aber OHNE Dateiendung! Dies kann mit Hilfe eines Rechtsklicks im Stammverzeichnis → *Neu* → *Textdokument* getätigt werden.
8. Stecken Sie die SD-Karte nach erfolgreichem Schreibvorgang des Images in den Raspberry Pi.
9. Verbinden Sie anschließend den Raspberry Pi mit Hilfe eines Netzkabels mit dem Netzwerk.
10. Versorgen Sie den Raspberry Pi mit Spannung. Dieser bootet daraufhin selbstständig.

## A2 Bestimmung der IP-Adresse des Raspberry Pi



### HINWEIS!

Die IP-Adresse des Raspberry Pi kann z. B. mit Hilfe eines IP-Scanners oder eines im Netzwerk vorhandenen Routers ermittelt werden.

## A3 Verbindung zum Raspberry Pi herstellen

Für die Konfiguration des Raspberry Pi ohne Monitor und Tastatur wird lediglich das Programm *PuTTY* (<http://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/latest.html>) benötigt. Mit diesem Programm kann von einem PC mit Microsoft Windows eine SSH-Verbindung über das Netzwerk mit dem Raspberry Pi aufgebaut werden. Das

Konfigurieren des Raspberry Pi und die Installation weiterer Software erfolgt über die Linux-Shell.

1. Starten Sie das Programm *PuTTY*.
2. Tragen Sie im Feld *Host Name (or IP address)* die IP-Adresse des Raspberry Pi ein und wählen Sie den Port 22 (Abb. A-2).
3. Wählen Sie als *Connection type*: *SSH*.
4. Klicken Sie die Option *Open* und bauen Sie dadurch eine Verbindung zum Raspberry Pi auf.

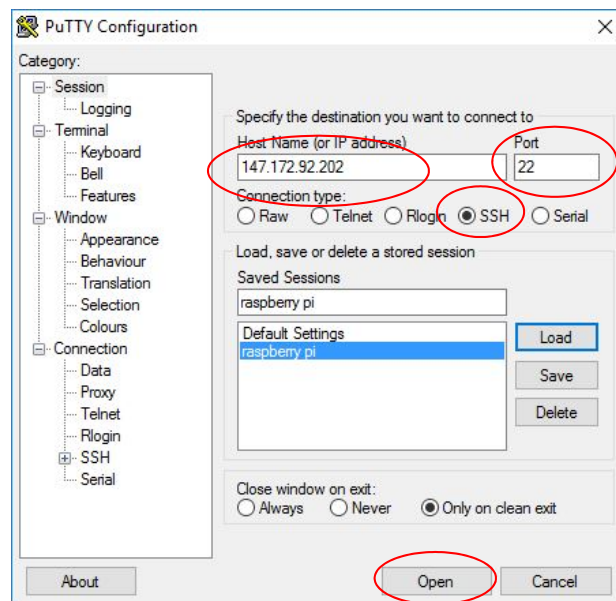


Abb. A-2: PuTTY Konfiguration

Ein Terminal-Fenster öffnet sich.



Abb. A-3: PuTTY Login Shell

## A4 Konfiguration des Raspberry Pi



### HINWEIS!

Das Terminal-Fenster vom Raspberry Pi ist gestartet.

1. Geben sie als Benutzernamen den Standard-Benutzernamen *pi* und als Passwort *raspberrypi* ein.
2. Geben Sie in der Linux-Shell *pi* ein und bestätigen Sie mit *ENTER*. Anschließend wird *raspberrypi* für das Passwort eingegeben.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
login as: pi
pi@147.172.92.230's password: raspberrypi
```

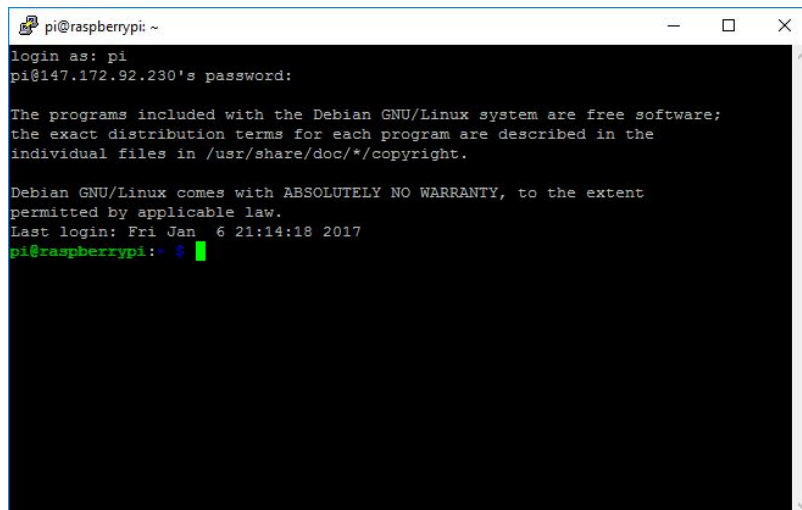


Abb. A-4: Erfolgreicher Login am Raspberry Pi

3. Geben Sie in der Linux-Shell `sudo apt-get update` ein und bestätigen Sie mit *ENTER*.
4. Wiederholen Sie den Vorgang mit `sudo apt-get dist-upgrade`

Eingabefeld Linux-Shell:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get dist-upgrade
```

**HINWEIS!**

Raspbian liest daraufhin alle Paketlisten neu ein und bringt anschließend installierte Pakete, falls neue Versionen vorhanden sind, auf die verbesserte Version, wobei Paketversionen automatisch installiert oder sogar entfernt werden können.

5. Starten Sie an dieser Stelle mit dem Befehl `sudo reboot` das Betriebssystem neu, damit die vorher eingestellten Parameter übernommen werden.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
sudo reboot
```

6. Nach dem Neustart kann über *raspi-config* der Raspberry Pi konfigurieren werden. Geben Sie dazu in der Linux-Shell `sudo raspi-config` ein und bestätigen Sie mit *ENTER*.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
sudo raspi-config
```

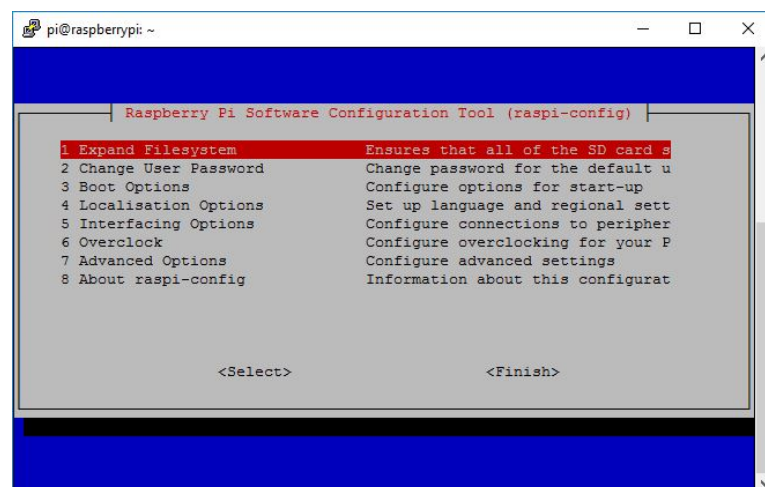
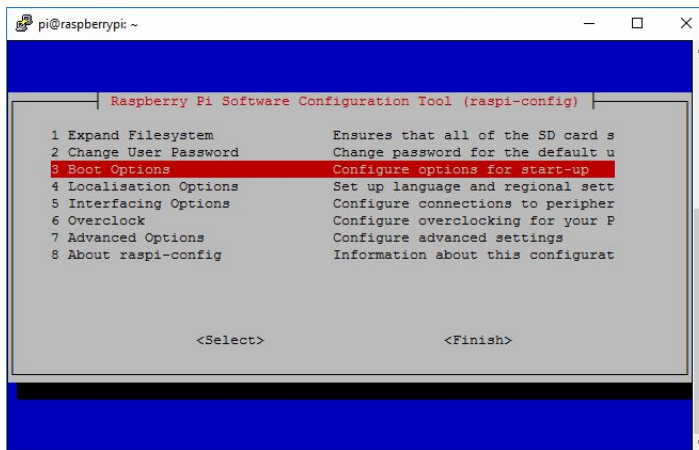


Abb. A-5: Konfigurationsmenü *raspi-config*

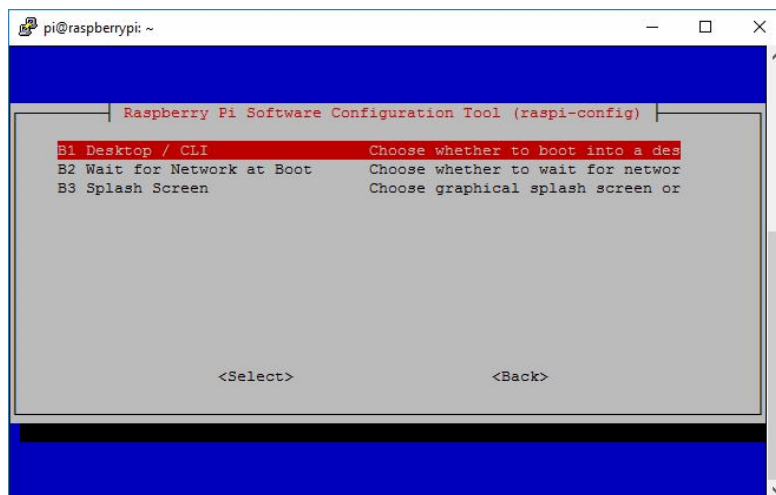
**HINWEIS!**

In dem sich nun öffnenden Konfigurationsmenü können Sie diverse Einstellungen tätigen. Unter anderem kann hier das Standard-Passwort geändert werden, was empfehlenswert ist.

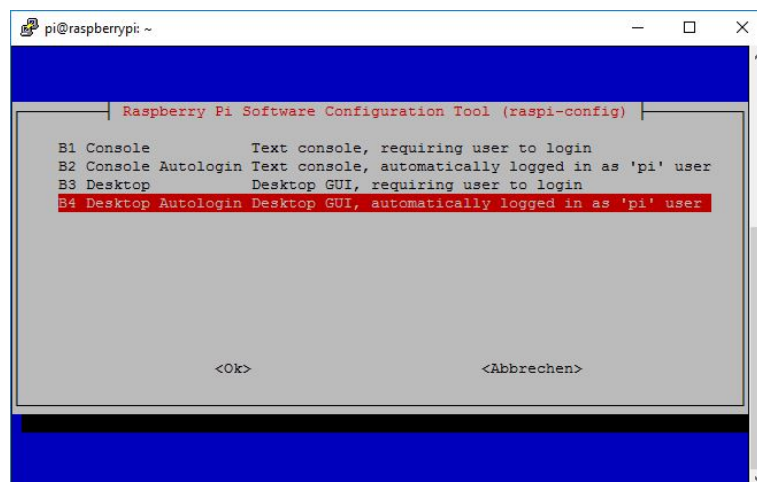
7. Konfigurieren Sie den Raspberry Pi nun so, dass der (grafische) Desktop nach dem Booten automatisch startet. Wählen Sie den Eintrag *3 Boot Options* aus.

Abb. A-6: Auswahl 3 *Boot Options*

8. Wählen Sie anschließend *B1 Desktop / CLI* aus.

Abb. A-7: Auswahl *B1 Desktop / CLI*

9. Bestätigen Sie anschließend mit *B4 Desktop Autologin Desktop GUI, automatically logged in as 'pi' user*.

Abb. A-8: Auswahl *B4 Desktop Autologin Desktop GUI, automatically logged in as 'pi' user*

10. Installieren Sie den Remote Desktop Server. Unter Linux bietet XRDP die Möglichkeit, über das Remote Desktop Protocol auf den Raspberry Pi über das Netzwerk zuzugreifen. Installieren Sie mit dem Befehl `sudo apt-get install xrdp` den Remote Desktop Server.

**HINWEIS!**

Dieser startet im Anschluss automatisch.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
sudo apt-get install xrdp
```

11. Starten Sie das Betriebssystem an dieser Stelle mit dem Befehl `sudo reboot` wieder neu, um die Änderungen zu aktivieren

Eingabefeld Linux-Shell:

```
sudo reboot
```

Der Raspberry Pi ist jetzt fertig konfiguriert und kann per Remote Desktop gesteuert werden.

## Anhang B: Installationsschritte für QLC +

Nachdem Raspbian Jessie with PIXEL wie in „Anhang A: Installation von Raspbian Jessie with PIXEL“ installiert ist, sind noch weitere Software-Pakete, für die Installation von QLC + erforderlich:

Eingabefeld Linux-Shell:

```
sudo apt-get install g++ make git build-essential libqt4-dev qt4-dev-  
tools fakeroot debhelper devscripts pkg-config  
sudo apt-get install libasound2-dev libusb-dev libftdi-dev libudev-dev  
libmad0-dev libsndfile1-dev libfftw3-dev
```



### HINWEIS!

Booten Sie dann das System neu.

## B1 Installation von QLC +

1. Wechseln Sie für die Installation in das Homeverzeichnis. Geben Sie Folgendes in das Eingabefeld ein:

Eingabefeld Linux-Shell:

```
cd /home/pi
```



### HINWEIS!

Damit die aktuelle Version von QLC + installiert werden kann, muss mit dem Tool *git* der aktuelle Stand aus dem Internet heruntergeladen werden.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
git clone https://github.com/mcallegari/qlcplus.git
```

2. Wechseln Sie anschließend in das Verzeichnis, in das die aktuelle Version von QLC + „geclont“ wurde:

Eingabefeld Linux-Shell:

```
cd qlcplus
```

3. Kompilieren Sie in das gewechselte Verzeichnis das Programm für den Raspberry Pi.

**HINWEIS!**

Dieser Vorgang kann einige Zeit dauern:

Eingabefeld Linux-Shell:

```
qmake
make -j4
sudo make install
```

Jetzt ist QLC + erfolgreich kompiliert und installiert.

## B2 Konfiguration von QLC +

1. Erstellen Sie mit folgendem Befehl ein konfiguriertes Web-Destop-Icon, damit QLC + Rasbian im Desktop ausgeführt werden kann.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
nano /home/pi/Desktop/qlcplus_web.desktop
```

2. Es öffnet sich der Editor *nano*. Geben Sie folgende Daten ein speichern Sie diese.

Eingabefeld nano-Shell:

```
[Desktop Entry]
Type=Application
Name=QLC web mode default workspace
GenericName=Lighting control
GenericName[de]=Lichtsteuerung
GenericName[fi]=Valojen ohjaus
GenericName[fr]=Contrôleur d'éclairages
GenericName[it]=Controllore di luci
Exec=qlcplus -w -p --open /home/pi/Documents/default.qxw
Icon=qlcplus
MimeType=application/x-qlc-workspace;
Categories=Lighting;Art;Qt;AudioVideo;
```

**HINWEIS!**

Benötigen Sie für QLC + unter Rasbian im Desktop ein normales Desktop-Icon benötigt, können sie dieses mit folgendem Befehl erstellen.

Eingabefeld Linux-Shell:

```
nano /home/pi/Desktop/qlcplus.desktop
```



Es öffnet sich der Editor *nano*. Geben Sie folgende Daten ein und speichern Sie diese:

Eingabefeld nano-Shell:

```
[Desktop Entry]
Type=Application
Name=QLC edit mode default workspace
GenericName=Lighting control
GenericName[de]=Lichtsteuerung
GenericName[fi]=Valojen ohjaus
GenericName[fr]=Controlleur d'éclairages
GenericName[it]=Controllore di luci
Exec=qlcplus -w --open /home/pi/Documents/default.qxw
Icon=qlcplus
MimeType=application/x-qlc-workspace;
Categories=Lighting;Art;Qt;AudioVideo;
```

## Anhang C: Remoteverbindung zum Raspberry Pi

1. Starten Sie eine Remotedesktopverbindung auf einem PC mit *Microsoft Windows*, z. B. die Remotedesktopverbindung von *Microsoft Windows*.
2. Tragen Sie unter *Computer* die IP-Adresse des Raspberry Pi ein (Abb. C-1).

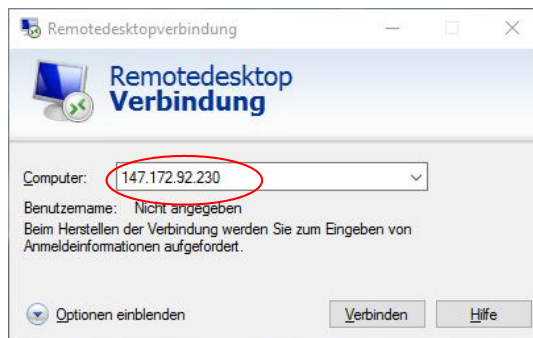


Abb. C-1: Remotedesktopverbindung

3. Der Remotedesktop-Client baut eine Verbindung zum Raspberry Pi auf. Es erscheint das Login-Fenster des Raspberry Pi. Hier geben Sie den zuvor festgelegten Benutzernamen und das dazugehörige Passwort ein und bestätigen mit *OK*.

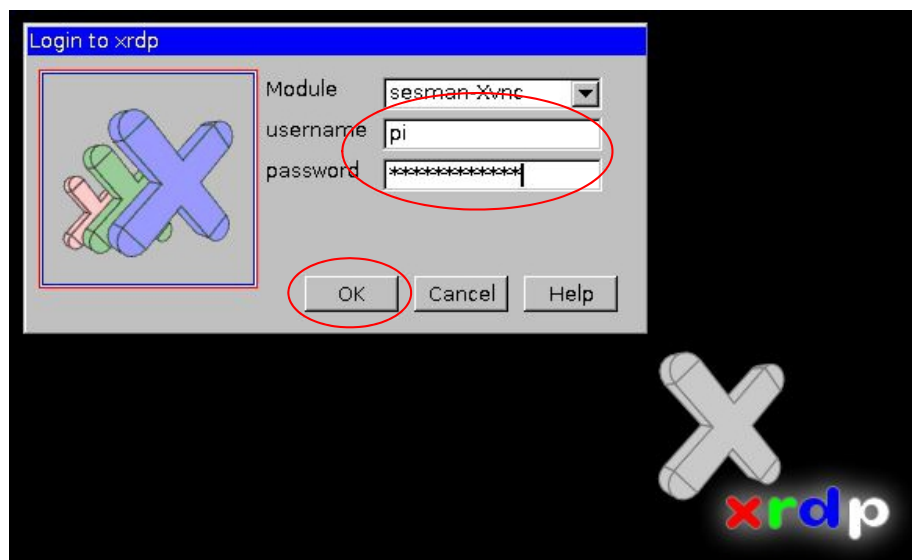


Abb. C-2: xrdp-Login des Raspberry Pi

4. Anschließend öffnet sich der Remotedesktop des Raspberry Pi. Auf dem Desktop befinden sich die zwei Verknüpfungen, die in „Anhang B Abschnitt B2“ erstellt wurden.

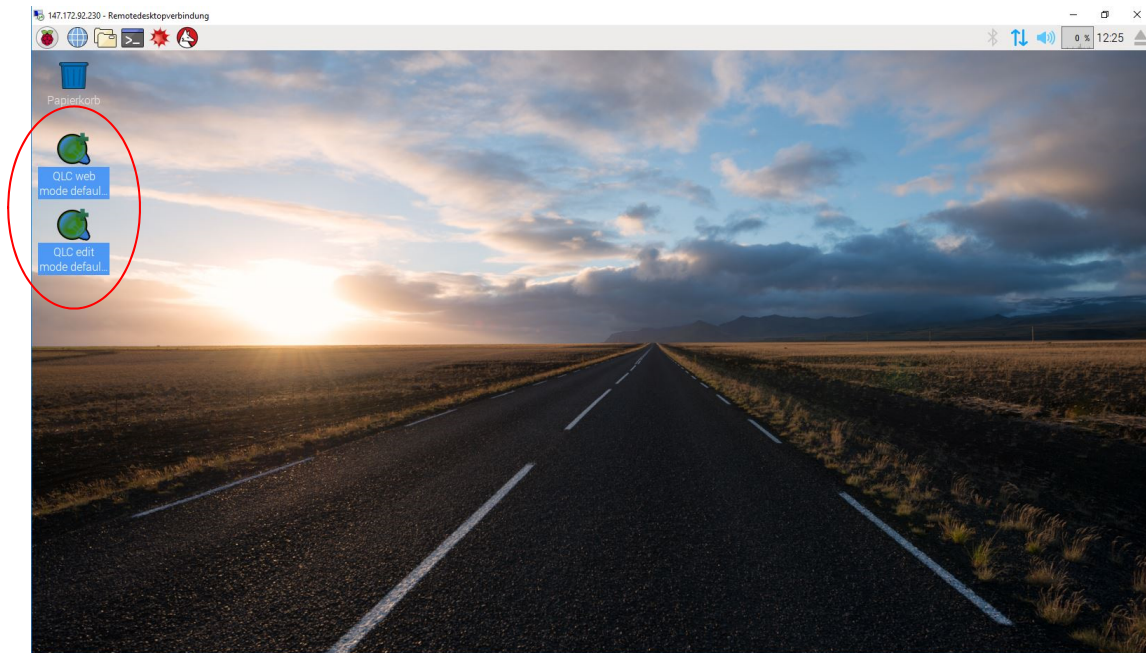


Abb. C-3: Remotedesktop des Raspberry Pi mit den zwei Verknüpfungen von QLC +

5. In QLC + kann jetzt die Programmoberfläche für die HGBSK erstellt werden. Diese kann z. B. wie folgt aussehen:

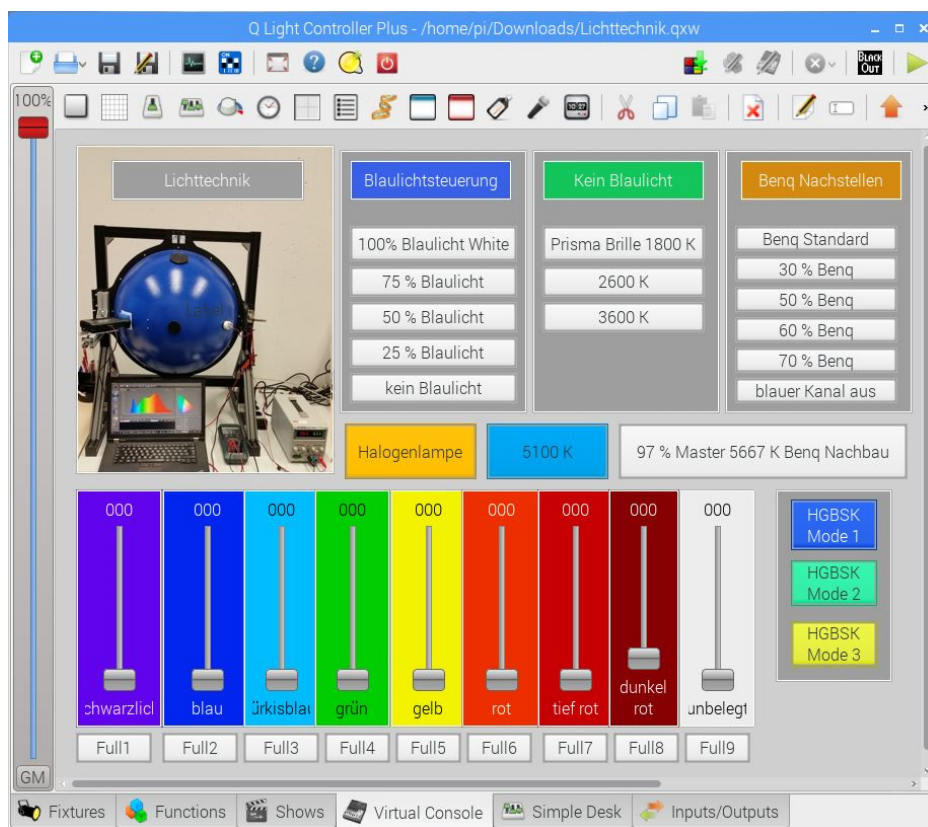


Abb. C-4: Übersicht Lichtsteuerung der HGBSK in QLC +

## Anhang D: Transmission des Hintergrundbeleuchtungsaufbaus mit LCD

Für die Bestimmung der Transmission des LCDs wird der Hintergrundbeleuchtungsaufbau mit LCD zerlegt. Es werden alle Schichten einzeln sowie der gesamte Aufbau untersucht (Abb. D-1).

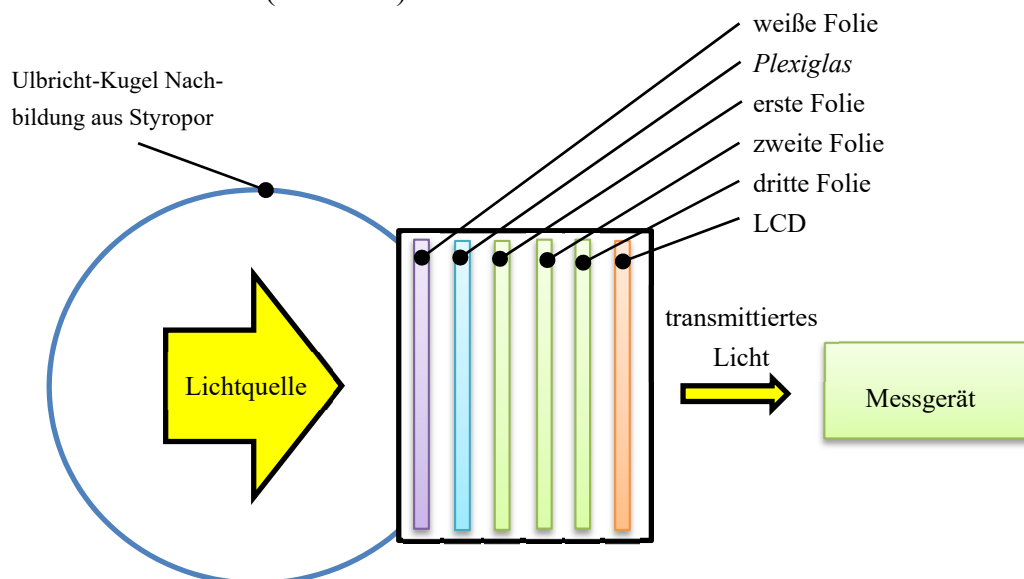


Abb. D-1: Hintergrundbeleuchtungs-Aufbau mit LCD

Es wird eine LED-Leuchte eingemessen und anschließend jede einzelne Schicht zwischen Messgerät und Lichtquelle platziert und der jeweilige Transmissionsgrad bestimmt. Dabei ergeben sich die Werte in Tabelle D-1.

	Beleuchtungsstärke in Lux	Transmission in %	Verluste in %	Verluste in Lux
<b>Beleuchtungsstärke der LED-Leuchte</b>	3900,0			
<i>Plexiglas</i>	3889,9	99,74	0,26	10,1
<b>erste Folie</b>	3806,6	97,86	2,14	83,2
<b>zweite Folie</b>	3733,5	98,08	1,92	73,1
<b>dritte Folie</b>	3733,5	100,00	0,00	0,0
<b>LCD</b>	165,0	4,42	95,58	3568,5

Tab. D-1: Transmission LCD

In Abb. D-2 sind die Lichtspektren der HGBSK ohne und mit LCD dargestellt. Zu erkennen ist, dass das Lichtspektrum der HGBSK durch das LCD verändert wird. Dabei verliert das Lichtspektrum zusätzlich an Helligkeit (Tab. D-1).

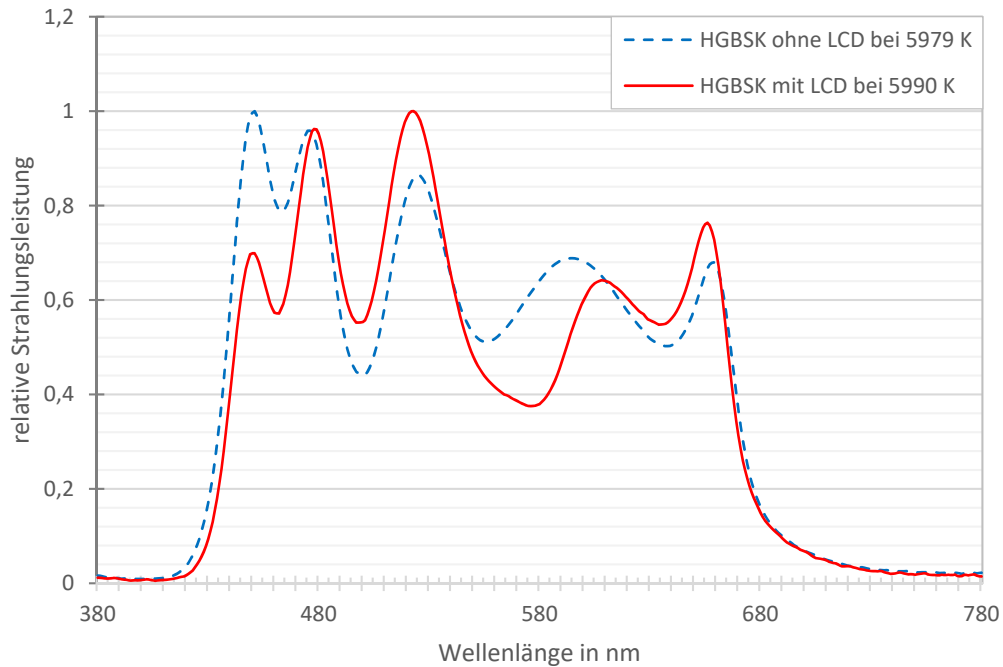


Abb. D-2: Veränderung des Lichtspektrums einer LED-Leuchte durch das LCD vom *Benq* BL2205

## Anhang E: Kalibrierung der LCD

Für die optimale Farbtreue eines Monitors oder die Anpassung mehrerer Monitore aufeinander kann eine Kalibrierung durchgeführt werden. Die Kalibrierung erfolgt mit Hilfe des Monitorkalibrierungstools „Datacolor Spyder 5 ELITE“ (Softwareversion 5.1). Dazu wird die Kalibrierungssoftware (Abb. E-1) gestartet und der Sensor auf dem LCD platziert (Abb. E-2). Nach der Eingabe der Monitorparameter erfolgt die Kalibrierung selbstständig.

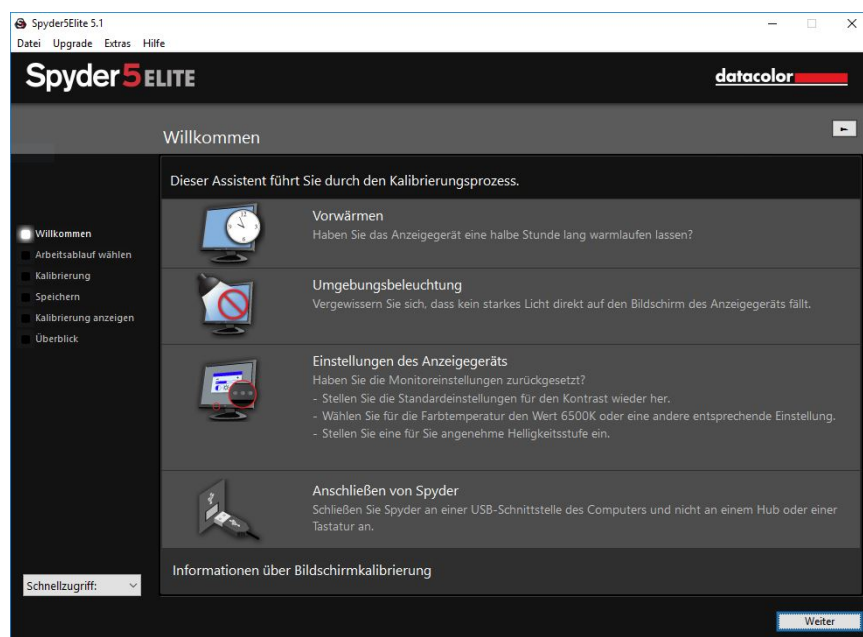


Abb. E-1: Programmoberfläche Datacolor Spyder 5 ELITE

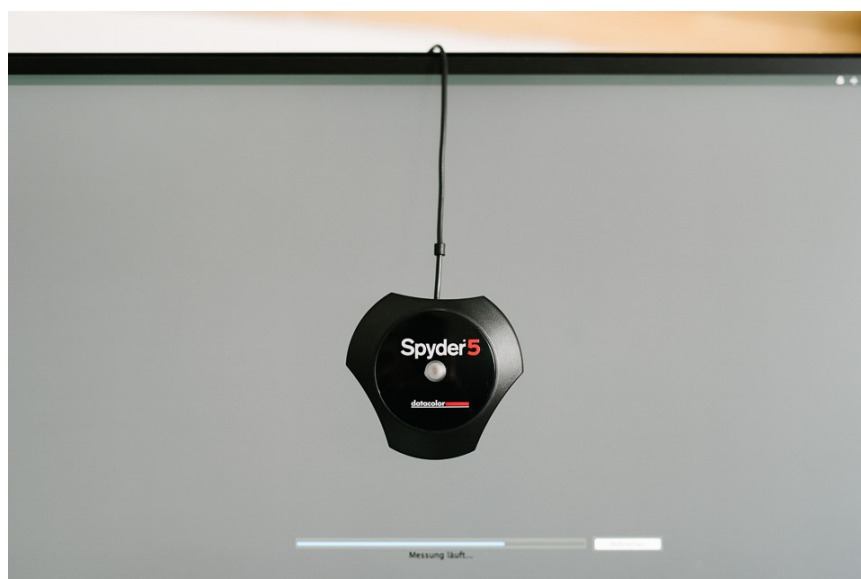


Abb. E-2: Kalibrierung eines Monitors

## Anhang F: Detailliergebnisse der Versuche

Betriebsart „Multimedia-Modus = 30% weniger Blaulicht“ *Benq* BL2205 mit der HGBSK nachgestellt:



Abb. F-1: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („Multimedia-Modus“) und der HGBSK

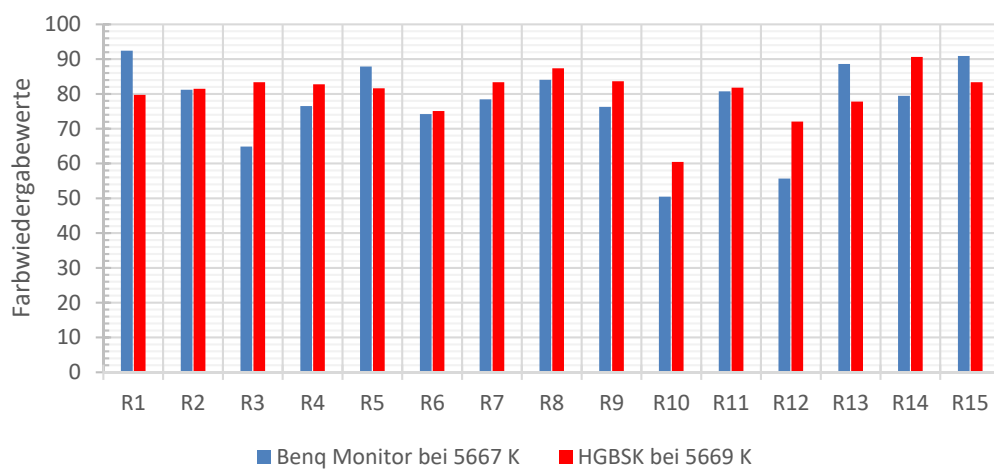


Abb. F-2: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („Multimedia-Modus“) und der HGBSK

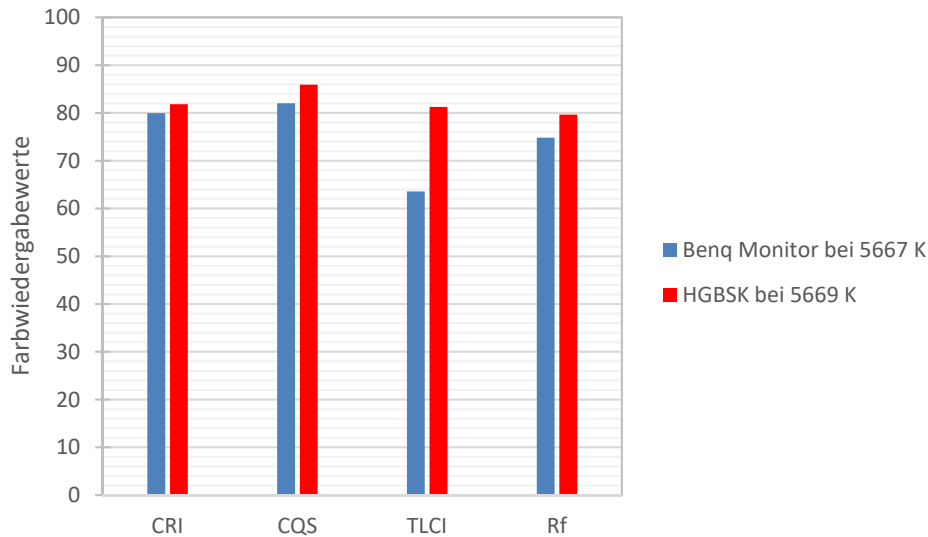


Abb. F-3: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („Multimedia-Modus“) und der HGBSK

Betriebsart "Web-Surfing-Modus = 50% weniger Blaulicht" Benq BL2205 mit der HGBSK nachgestellt:

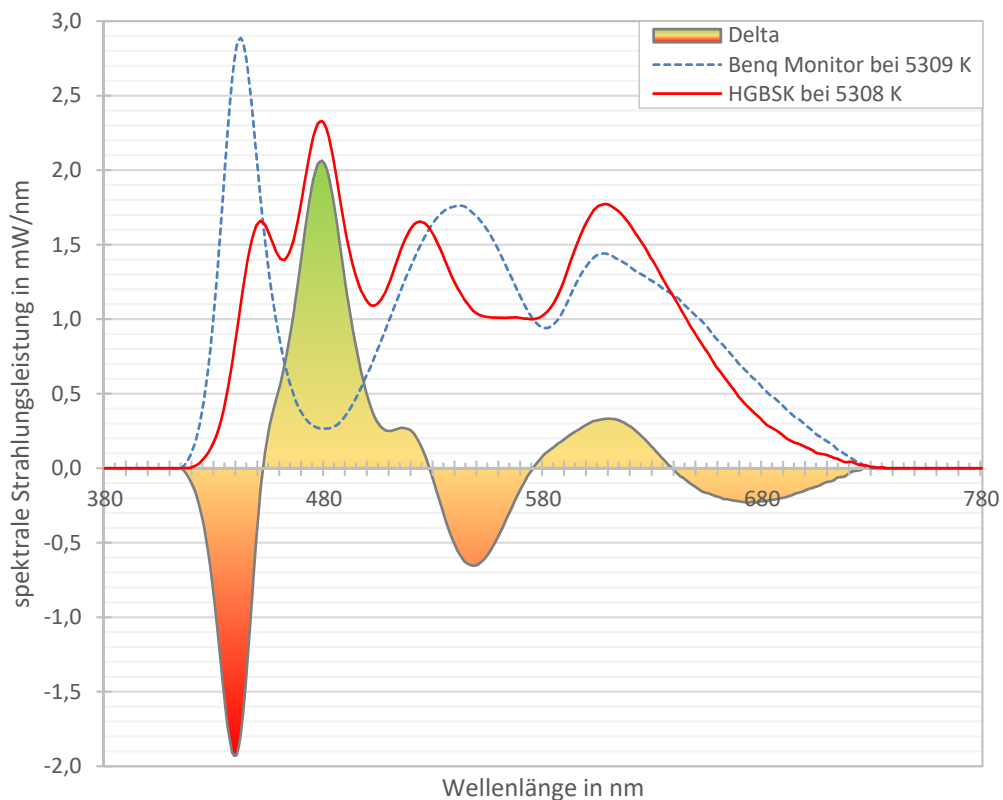


Abb. F-4: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („Web-Surfing-Modus“) und der HGBSK



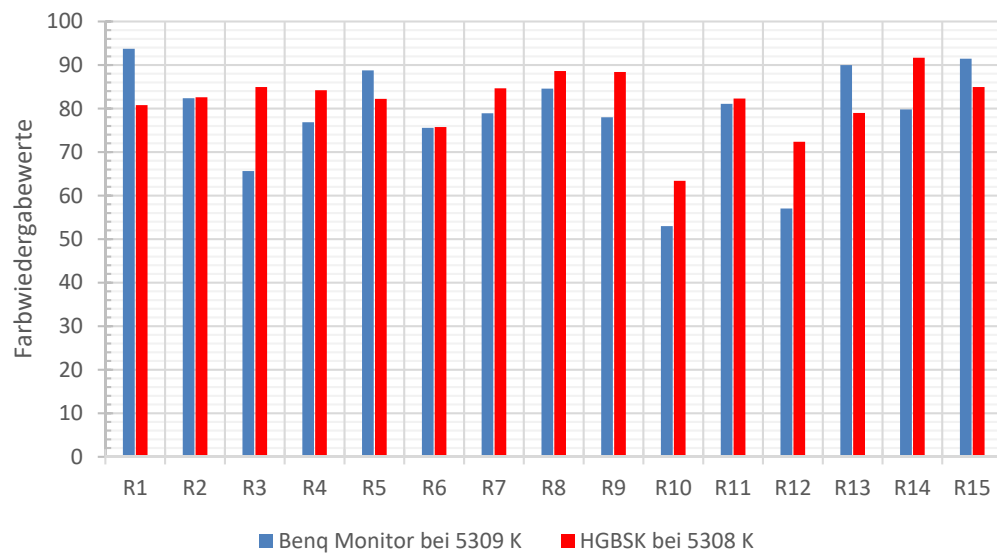


Abb. F-5: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („Web-Surfing-Modus“) und der HGBSK

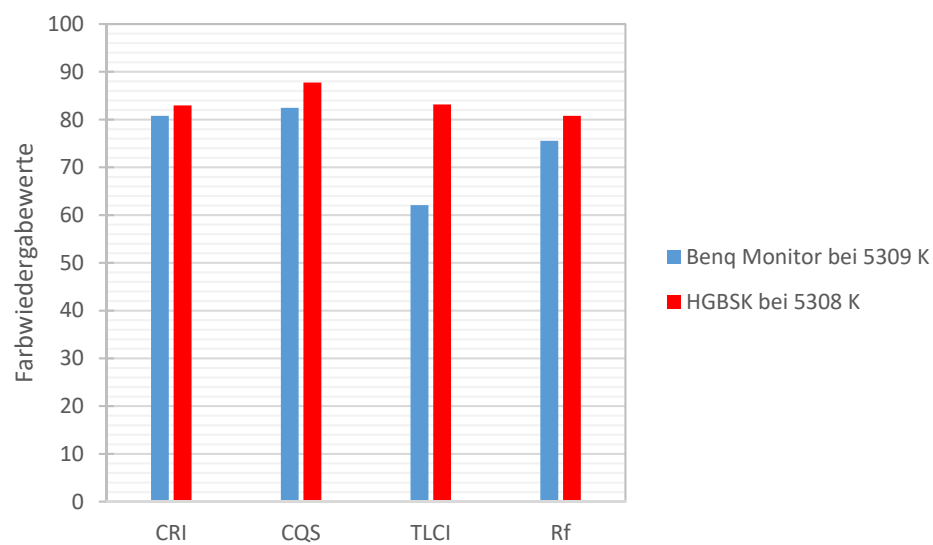


Abb. F-6: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („Web-Surfing-Modus“) und der HGBSK

Betriebsart "Office-Modus = 60% weniger Blaulicht" *Benq* BL2205 mit der HGBSK nachgestellt:

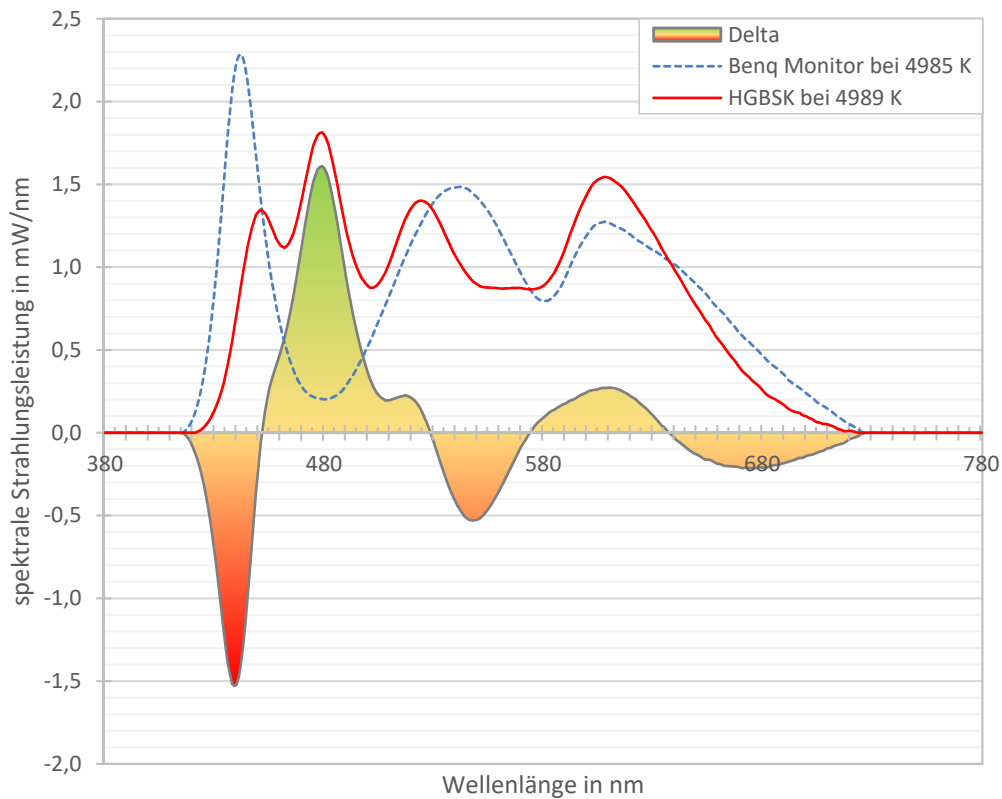


Abb. F-7: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („Office-Modus“) und der HGBSK

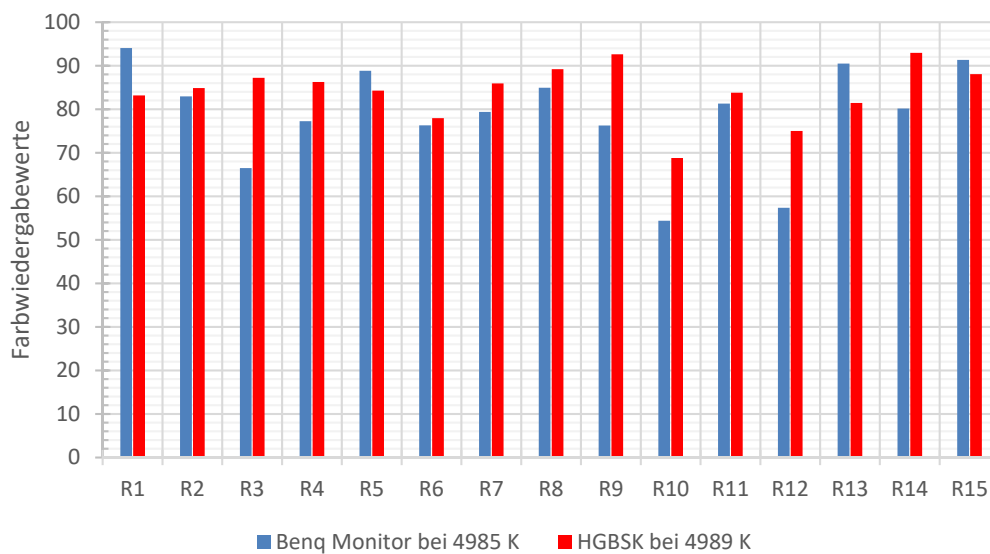


Abb. F-8: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („Office-Modus“) und der HGBSK

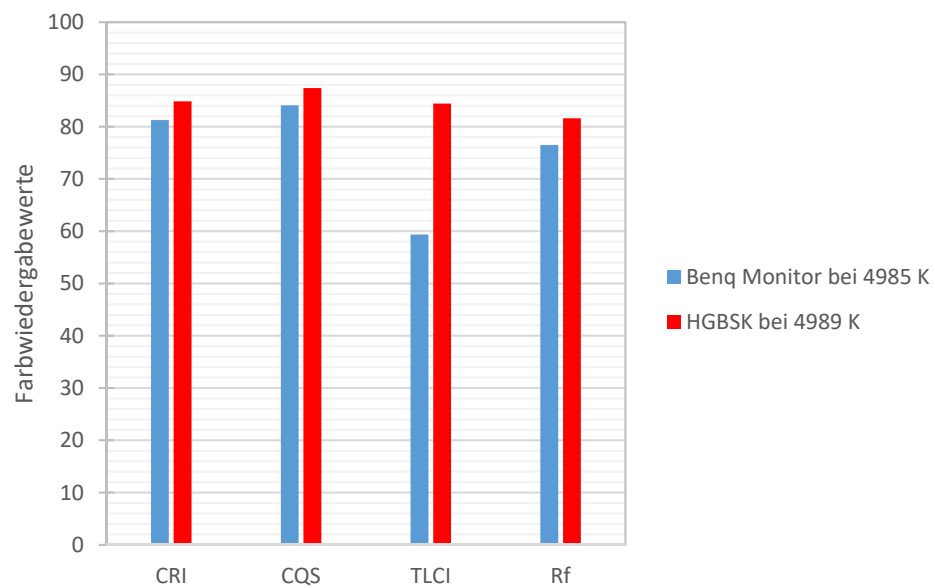


Abb. F-9: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („Office-Modus“) und der HGBSK

Betriebsart "blauer Kanal" Benq BL2205 mit der HGBSK nachgestellt:

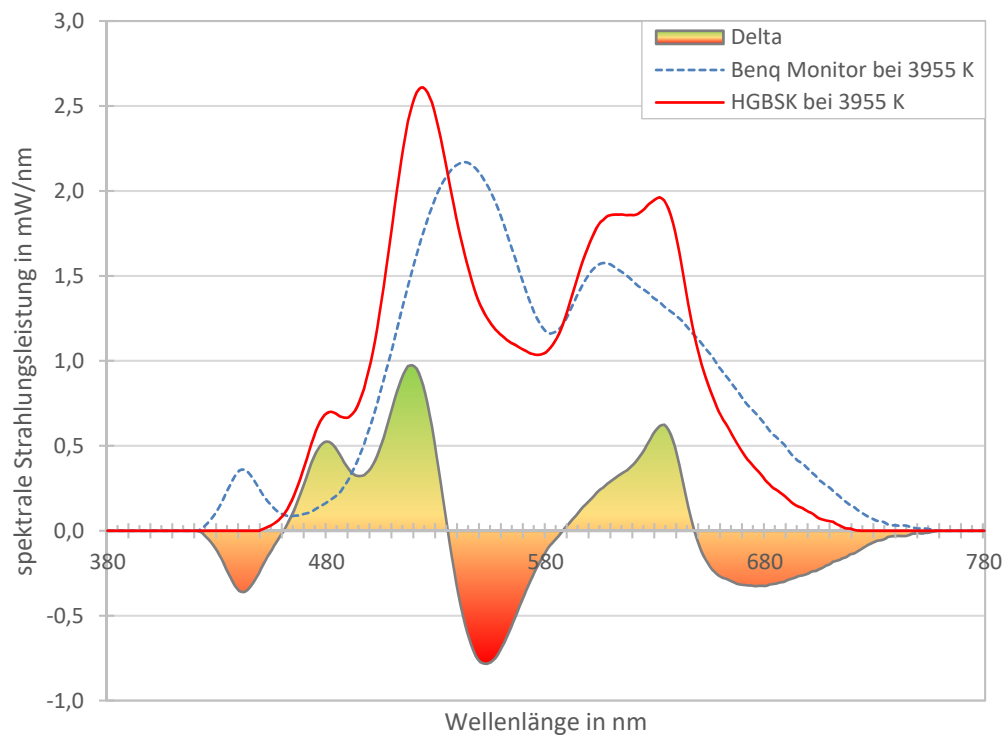


Abb. F-10: Vergleich der Lichtspektren des Benq Monitors („blauer Kanal“) und der HGBSK

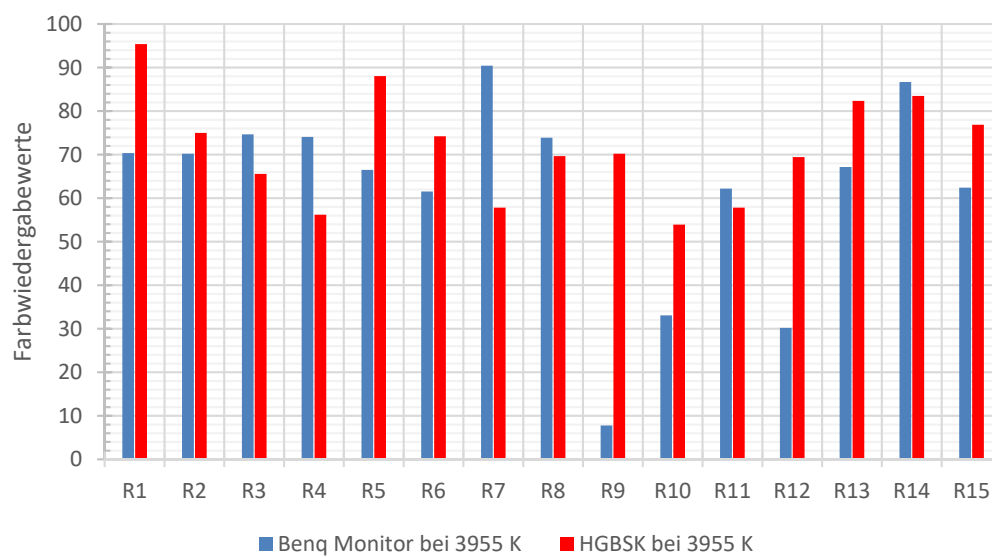


Abb. F-11: Darstellung der verschiedenen Farbwiedergabeindizes des Benq Monitors („blauer Kanal“) und der HGBSK

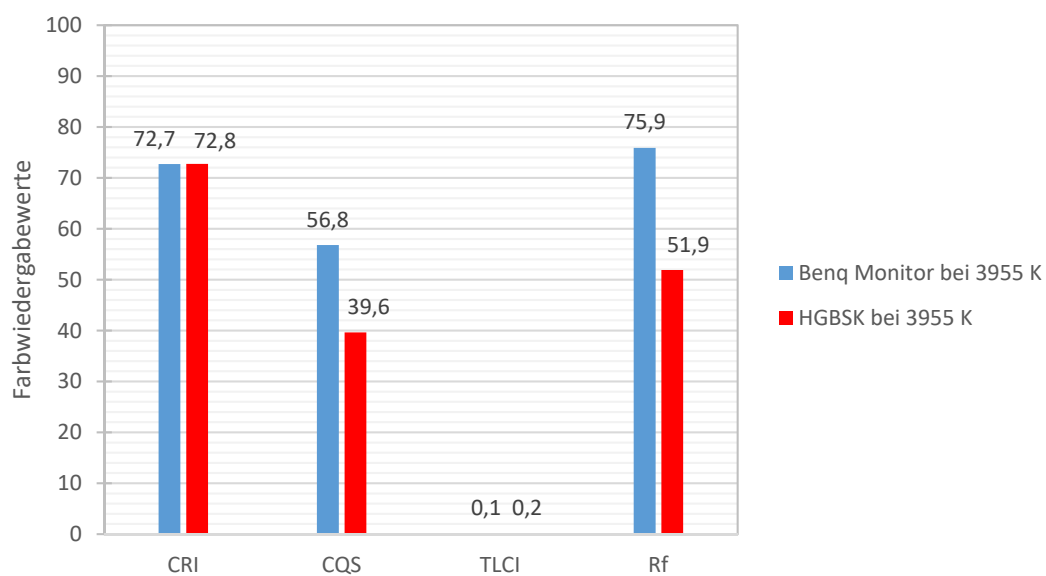


Abb. F-12: Gegenüberstellung der verschiedenen Lichtqualitätsindizes des Benq Monitors („blauer Kanal“) und der HGBSK